



Ana Margarida Escrivão Cardoso da Silva

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Acção do vento em seguidores solares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Professora Doutora Ildi Cismasiu
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida
Arguente: Professor Doutor Filipe Pimental Amarante dos Santos
Vogal: Professora Doutora Ildi Cismasiu



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2013

“Copyright” Todos os direitos reservados. Ana Margarida Escrivão Cardoso da Silva
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

As minhas palavras de sinceros agradecimentos quero dirigi-las, em primeiro lugar, à Professora Ildi Cismasiu que propôs a temática desta tese e orientou o trabalho desenvolvido. Agradeço todo o incentivo, disponibilidade e ajuda concedida. *Sincerele mele multumiri pentru intelegerea, sustinerea si cuvintele de incurajare pe care mi le-ati acordat pe parcursul acestei experiente complicate din viata mea.*

I would like to express my gratitude and appreciation to Dr. David Banks and Dr. Colleen O'Brien for clarifying my doubts about the American standard ASCE/SEI 7-10.

Ao Engenheiro Ricardo de Matos Camarinha agradeço os esclarecimentos às minhas dúvidas sobre alguns aspectos particulares da temática do vento. Nas fases mais “turbulentas”, os seus valiosos “e-mails” foram como “lufadas de ar fresco”.

Pelos diversos ensinamentos que me transmitiu, gostaria de expressar a minha gratidão ao amigo Engenheiro João Guterres.

Aos meus pais, eu agradeço por... **tudo**. Vocês estão na “base ou fundação” da minha “estrutura” enquanto pessoa e são os dois grandes “pilares” da minha vida. Esta tese dedico a vocês. Para “minorar” a “sobrecarga” das “acções acidentais” que actuaram sobre nós nos últimos tempos, espero que esta tese seja um “factor de majoração” da vossa alegria.

À minha avó, agradeço toda a “força” e “resistência” que sempre me transmitiu. A avó é a “estrutura” mais “hiperestática” que conheço; nunca entra em “cedência”, independentemente de quantas “rótulas” a vida lhe põe no caminho. Obrigada avó, pelo exemplo de vida.

À minha querida grande amiga Maria, o meu eterno obrigada pela companhia neste percurso solitário da tese e, acima de tudo, muito obrigada por todo o apoio e a grande amizade. À minha querida amiga Marta, agradeço a amizade de uma vida e o grande incentivo e coragem transmitida no sentido de me ajudar a encerrar este capítulo.

Às minhas colegas e amigas, Ana Margarida, Ana Sofia, Andreia, Inês, Joana e Tatiana, agradeço todo o companheirismo ao longo deste percurso académico e toda a amizade que, com muito carinho, quero preservar para toda a vida.

Resumo

A dissertação que se apresenta assenta, essencialmente, no estudo dos efeitos da acção do vento sobre o seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja. Para realizar este estudo recorreu-se a dois métodos distintos destinados a quantificar a acção máxima do vento que o seguidor pode experimentar no seu período de vida útil. Num dos métodos foram seguidas as directrizes da norma americana ASCE/SEI 7-10 adoptando, para o seguidor solar, os coeficientes de pressão propostos para coberturas isoladas de uma vertente inclinada de 45° com a horizontal. O uso desta norma, em detrimento do Eurocódigo 1, deve-se ao facto dela não incluir os referidos coeficientes para o caso mencionado. No outro método, a acção do vento é traduzida por forças variáveis no tempo calculadas a partir de séries temporais relativas à componente flutuante da velocidade do vento. Estas séries foram simuladas numericamente em Matlab com base no método WAWS (abreviatura inglesa de *Weighted Amplitude Wave Superposition*).

Para as acções de vento assim determinadas foram investigados os seus efeitos sobre o seguidor solar, recorrendo ao programa de elementos finitos SAP2000.

Palavras chave:

Acção do vento, seguidor solar, análise estrutural.

Abstract

Modeling wind action on solar trackers

The aim of this Master's thesis is to evaluate the response of the solar tracker (Amareleja Photovoltaic Solar Plant) under the wind action. Two approaches were adopted to determine the maximum wind load that the solar tracker will experience during its lifetime. The first method computes the equivalent static wind load that produces the maximum load effects on the solar tracker according to ASCE/SEI 7-10 standard adopting for the solar tracker the pressure coefficients proposed for monoslope free roofs inclined at 45° . The use of this standard rather than Eurocode 1 is due to the latter not including the above-mentioned coefficients. On the other method, the wind action is described by time-history forces, calculated from time series related to the fluctuating component of the wind speed. The time series were numerically simulated based on the WAWS (Weighted Amplitude Wave Superposition) method developed in Matlab.

For the wind actions thus determined, their effects on the solar tracker were estimated, through the finite element software SAP2000.

Keywords:

Wind loading, solar tracker, structural analysis.

Índice de Matérias

Índice de Matérias	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xxi
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Organização da dissertação	4
2 Acção do Vento	5
2.1 Origem do vento	6
2.2 Caracterização do comportamento do vento	6
2.2.1 Velocidade média do vento	9
2.2.2 Caracterização da turbulência do vento	12
2.2.2.1 Intensidade de turbulência	13
2.2.2.2 Função de autocorrelação e de correlação cruzada	13
2.2.2.3 Escala de turbulência	14
2.2.2.4 Função de densidade espectral de potência	15
2.2.2.5 Função de densidade espectral de potência cruzada	18

2.2.3	Simulação numérica da velocidade flutuante do vento	19
2.2.3.1	Método WAWS	20
2.3	Interacção vento-estrutura	25
2.4	Determinação da acção do vento	27
2.4.1	Relação entre a velocidade e a força do vento	27
2.4.2	Força estática do vento baseada no método GLF	28
3	Acção do Vento em Seguidores Solares	31
3.1	Considerações gerais	31
3.2	Modelos de seguidores solares	32
3.3	Redução da acção do vento em centrais fotovoltaicas	34
3.3.1	Valores de coeficientes de pressão e força para <i>coberturas isoladas de uma vertente</i>	39
3.4	Acção do vento em <i>coberturas isoladas de uma vertente</i> segundo a norma ASCE/SEI 7-10	43
3.4.1	Pressão exercida pelo vento em <i>coberturas isoladas de uma vertente</i> . .	44
3.4.1.1	Pressão dinâmica do vento	44
	Coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$	45
	Coeficiente de orografia, c_o	46
	Coeficiente de direcção, c_{dir}	46
	Velocidade de rajada, V	46
3.4.1.2	Factor de rajada	46
3.4.2	Coeficiente estrutural	47
3.4.2.1	Coeficiente estrutural para estruturas <i>rígidas</i>	47
	Intensidade de turbulência, $I_v(z_s)$	48
	Coeficiente de fundo da resposta, Q	48
3.4.3	Função de densidade espectral de potência adimensional	48
3.4.4	Coeficientes de pressão	49
4	Análise e Modelação do Seguidor Solar	51
4.1	Central Fotovoltaica da Amareleja	51
4.2	Seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja	52
4.2.1	Descrição dos elementos estruturais	54
4.2.1.1	Grupo coluna e cabeça do seguidor	54
4.2.1.2	Suporte metálico	56

4.2.1.3	Painéis fotovoltaicos	58
4.2.1.4	Ligações	60
4.2.2	Caracterização mecânica dos materiais	62
4.2.2.1	Seguidor solar	63
4.2.2.2	Ligações	63
4.2.2.3	Painéis fotovoltaicos	64
4.2.3	Caracterização geométrica das secções	64
4.3	Modelo estrutural	64
4.4	Definição das acções	70
4.4.1	Determinação da pressão do vento segundo a norma ASCE/SEI 7-10	71
4.4.2	Determinação da força do vento variável no tempo	76
4.4.2.1	Simulação numérica da velocidade flutuante do vento	77
4.4.3	Combinação de acções	85
5	Resultados	89
5.1	Resultados obtidos através das análises estática e dinâmica	90
5.1.1	Esforços internos nos elementos estruturais	90
5.1.2	Deslocamentos nodais e deformação global da estrutura	95
5.2	Verificações de segurança	100
5.2.1	Verificação de segurança aos Estados Limites Últimos	100
5.2.1.1	Verificação da segurança das secções transversais	101
5.2.1.2	Verificação da segurança da coluna grande à encurvadura	105
5.2.1.3	Verificação da resistência das ligações aparafusadas L_1 , L_2 e L_3	106
5.2.2	Verificação da segurança aos Estados Limites de Utilização	108
5.3	Análise e discussão dos resultados	112
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	115
6.1	Conclusões	115
6.2	Desenvolvimentos futuros	116
	Bibliografia	117
A	Caracterização Geométrica das Secções Transversais	123
B	Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal	129

C	Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para <i>coberturas isoladas inclinadas</i> até ângulos de 30°	135
C.1	Força exercida pelo vento em <i>coberturas isoladas de uma vertente</i> segundo o Eurocódigo 1	135
C.1.1	Pressão dinâmica de pico, $q(z)$	136
C.1.1.1	Velocidade média do vento, $\bar{v}(z)$	136
C.1.1.2	Intensidade de turbulência, $I_v(z)$	137
C.1.2	Coeficiente estrutural, G	138
C.1.3	Coeficientes de força, c_f , e de pressão, c_p	138
C.2	Comparação entre as forças do vento em <i>coberturas isoladas inclinadas</i> até ângulos de 30° segundo a ASCE e o EC1	138
C.2.1	Forças do vento sobre <i>coberturas isoladas de uma vertente</i> inclinadas até 30° de acordo com a ASCE e EC1	139
D	Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento	143
D.1	Rotinas desenvolvidas em Matlab	143
D.1.1	Simulação numérica de $\tilde{v}(t)$ considerando a total correlação entre séries temporais	143
D.1.2	Simulação numérica de $\tilde{v}(t)$ considerando a possível falta de total correlação entre as séries temporais	148
D.2	Geração de séries temporais recorrendo à primeira rotina computacional desenvolvida em Matlab	151
E	Análise do Seguidor Solar	155
F	Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica. Diagramas de Esforços	159
F.1	Análise Estática	159
F.1.1	Perfis C_1 e C_2	159
F.1.2	Perfis OM	161
F.1.2.1	Perfis OM_1 e OM_{12}	161
F.1.2.2	Esforço axial, N_{Ed} , nos perfis OM_6 e OM_7	163
F.1.3	Viga V1	164
F.1.4	Viga V2	166
F.1.5	Vigas V3	168

F.1.6	Tubos facar	170
F.1.7	Colunas grande e pequena	172
F.2	Análise dinâmica	173
F.2.1	Perfis C_1 e C_2	173
F.2.2	Perfis OM	174
F.2.2.1	Perfis OM_1 e OM_{12}	174
F.2.2.2	Esforço axial N_{Ed} nos perfis OM_6 e OM_7	175
F.2.2.3	Viga V1	176
F.2.2.4	Viga V2	176
F.2.2.5	Viga V3	177
F.2.2.6	Tubos facar	178
F.2.2.7	Colunas grande e pequena	179
G	Disposições Gerais do Eurocódigo 3, Parte 1:1 e Parte 1:8	181
G.1	Disposições do Eurocódigo 3, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios .	181
G.1.1	Resistência das secções transversais	181
G.1.1.1	Esforço axial de tracção	184
G.1.1.2	Esforço axial de compressão	184
G.1.1.3	Momento flector	185
G.1.1.4	Esforço transverso	185
G.1.1.5	Torção	185
G.1.1.6	Interacção momento flector - esforço transverso	187
G.1.1.7	Flexão composta: interacção momento flector - esforço axial	188
G.1.1.8	Flexão desviada	189
G.1.2	Resistência dos elementos estruturais à encurvadura	189
G.2	Disposições do Eurocódigo 3 Parte 1-8: Projecto de ligações	191
H	Classificação das Secções Transversais do Seguidor Solar	193

Índice de Figuras

2.1	Registo da velocidade do vento em função da altura z e do tempo t	7
2.2	Componentes longitudinal (\tilde{v}_v), transversal (\tilde{v}_t) e vertical (\tilde{v}_w) da velocidade do vento [23].	8
2.3	Perfil da velocidade média do vento para terrenos de diferentes rugosidades [25]. .	9
2.4	Velocidades médias temporais do vento \bar{v}_T e V_τ correspondentes a períodos de amostragem T e τ , respectivamente.	11
2.5	Curva de $S_v(f)/\sigma_v^2$ em função da frequência, f , mostrando as regiões distintas A, B e C [37].	16
2.6	Funções de densidade espectral de potência adimensional propostas por Davenport, Kaimal, EC1 e ASCE.	18
2.7	Definição do intervalo de frequência Δf da relação 2.32 [46].	21
2.8	Representação das N matrizes $S(f_n)$	23
2.9	Momento torsor M_t e forças aerodinâmicas F_D e F_L devidas às tensões τ_w e pressões p	26
3.1	Tipos de seguidores solares [54].	33
3.2	Rotações θ e ψ dos seguidores solares.	34
3.3	Redução da velocidade média do vento da periferia para o interior de uma Central.	35
3.4	Disposição das vedações no interior de centrais fotovoltaicas [11].	35
3.5	Redução da velocidade média do vento nos seguidores periféricos, na presença de um muro em redor da Central.	36

Índice de Figuras

3.6	Definição de A_B e A_F para o cálculo da “área de abrigo”, A_a [13].	37
3.7	Definição das áreas de abrigo, A_a , para seguidores dispostos na primeira e segunda “fileiras” [13].	38
3.8	Escoamento do ar nos vértices rectos do seguidor solar.	38
3.9	Mecanismos de redução dos efeitos da turbulência [11].	39
3.10	Pressão do vento nas superfícies superior, p_s , e inferior, p_i , de uma <i>cobertura isolada de uma vertente</i>	40
3.11	Distribuição da pressão do vento e localização do centro de força global do vento segundo EC1 [27].	41
3.12	Distribuição da pressão para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10, para os sentidos I e II do vento.	42
3.13	Variação de \bar{v}_t/\bar{v}_{3600} com o tempo t [28].	47
3.14	Distribuição das pressões do vento sobre uma <i>cobertura isolada de uma vertente</i> de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10.	50
4.1	Planta da Central Fotovoltaica da Amareleja [2].	52
4.2	Fotografia de alguns dos seguidores solares da Central da Amareleja mostrando os painéis fotovoltaicos.	53
4.3	Fotografia destacando um seguidor solar da Central da Amareleja, em que se observa a estrutura metálica.	53
4.4	Figura esquemática do seguidor solar.	54
4.5	Componentes do grupo coluna e cabeça do seguidor [57].	55
4.6	Dimensões da cabeça do seguidor.	56
4.7	Ligação da base da coluna grande à sapata de betão [57].	56
4.8	Configuração do suporte metálico.	57
4.9	Posição das vigas V1, V2 e V3 em relação à cabeça do seguidor.	58
4.10	Painel fotovoltaico da Central Fotovoltaica da Amareleja [5].	58
4.11	Disposição dos painéis fotovoltaicos.	59
4.12	Ligação soldada, L_s , e ligações L_1 e L_2	60
4.13	Ligação L_2 entre as vigas V1 e V3.	61
4.14	Ligação L_3 entre um perfil OM e a viga V1.	61
4.15	Ligação L_4 entre um perfil OM e o perfil C_1 e ligação $L_{4'}$ entre os perfis C_1 e U_1	62
4.16	Ligação L_5 entre um tubo TC e a viga V1.	62
4.17	Forças do vento transmitidas aos perfis C e OM.	65
4.18	Representação do modelo estrutural do seguidor em SAP2000.	66

4.19	Ligação L_3 traduzida no programa SAP2000 [®] por um elemento <i>Link1</i>	67
4.20	Representação da ligação L_1 por meio de elementos <i>Link2</i> e <i>Link3</i>	68
4.21	Área de influência de cada nó i	71
4.22	Diagramas de pressão nos painéis fotovoltaicos.	75
4.23	Forças pontuais F_i sobre os perfis C e OM.	76
4.24	Velocidade média do vento a diferentes alturas z_i , segundo as normas ASCE e EC1.	77
4.25	Séries temporais de $v(z_i, t)$ para as alturas z_1 , z_5 e z_9 consideradas.	79
4.26	Séries temporais de $\tilde{v}(z_5, t)$	80
4.27	Coordenadas dos cento e vinte seis pontos a considerar para efeitos da simulação da velocidade flutuante do vento.	82
4.28	Velocidade flutuante do vento à altura $z = 4,7$ m nos casos de total correlação espacial e de possível ausência desta.	83
5.1	Nomenclatura atribuída aos nós dos dois perfis C e dos perfis OM ₁ e OM ₁₂	91
5.2	Nomenclatura atribuída aos nós da viga V1.	92
5.3	Nomenclatura atribuída aos nós da viga V2.	93
5.4	Nomenclatura atribuída aos nós das vigas V3.	93
5.5	Nomenclatura atribuída aos nós dos tubos facar.	94
5.6	Nomenclatura atribuída aos nós das colunas grande e pequena.	94
5.7	Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[S,A].	96
5.8	Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[S,B].	96
5.9	Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[P,A].	97
5.10	Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[P,B].	97
5.11	Configuração deformada do grupo coluna e cabeça do seguidor para as combinações de acções indicadas.	98
5.12	“Levantamento” e “abaixamento” dos painéis fotovoltaicos.	99
5.13	Deslocamentos “ascendentes” e “descendentes” dos nós do perfil U ₁	109
5.14	Deslocamentos “ascendentes” e “descendentes” dos nós do perfil U ₂	110
5.15	Deslocamentos “descendentes” relativos nos painéis fotovoltaicos.	111
5.16	Deslocamentos “ascendentes” relativos nos painéis fotovoltaicos.	111
A.1	Secção transversal UPE 100.	123
A.2	Secção transversal OM.	124
A.3	Secção transversal IPE 240.	124
A.4	Secção transversal L203×152×25,4 mm.	125

Índice de Figuras

A.5	Secção transversal tubular rectangular 300×200×8 mm.	125
A.6	Secção transversal composta por três tubos rectangulares 300×200×8 mm.	126
A.7	Secção transversal tubular rectangular 50×50 mm.	126
A.8	Secção transversal tubular circular Ø559 mm.	127
A.9	Secção transversal tubular circular Ø762 mm.	127
B.1	Registos da velocidade média na estação metereológica da Amareleja.	130
B.2	Registos da velocidade média na estação metereológica de Beja.	131
B.3	Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.	132
B.4	Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.	133
B.5	Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.	134
C.1	Força total do vento sobre o seguidor solar para os ângulos θ : 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° e 30°.	140
D.1	Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro da ASCE.	154
D.2	Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro do EC1.	154
D.3	Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro de Davenport.	154
E.1	Nomenclatura atribuída às fileiras f.i (i= 1,..., 9) e respectivas alturas z_i	156
E.2	Nomenclatura atribuída aos nós i da malha metálica.	156
E.3	Nomenclatura atribuída a alguns dos nós das vigas V1 e V2.	157
E.4	Nomenclatura atribuída a alguns dos nós da cabeça do seguidor e grupo coluna.	158
F.1	Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [S,A].	159
F.2	Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [S,B].	160
F.3	Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,A].	160
F.4	Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,B].	161
F.5	Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [S,A].	161
F.6	Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [S,B].	162
F.7	Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [P,A].	162
F.8	Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [P,B].	163
F.9	Diagrama de esforço axial, N_{Ed} [kN], nos perfis OM_6 e OM_7 para as quatro combinações.	163
F.10	Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [S,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	164

F.11 Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [S,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	164
F.12 Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	165
F.13 Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	165
F.14 Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [S,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	166
F.15 Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [S,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	166
F.16 Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	167
F.17 Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	167
F.18 Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [S,A].	168
F.19 Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [S,B].	168
F.20 Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,A].	169
F.21 Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,B].	169
F.22 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,A]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	170
F.23 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,B]: $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	170
F.24 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,A]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	171
F.25 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,B]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	171
F.26 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,A].	172
F.27 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,B].	172
F.28 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,A].	173
F.29 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,B].	173
F.30 Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,B].	174
F.31 Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [S,B].	174
F.32 Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [P,B].	175

Índice de Figuras

F.33 Diagrama de esforço axial, N_{Ed} [kN], nos perfis OM ₆ e OM ₇ para as quatro combinações.	175
F.34 Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	176
F.35 Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].	176
F.36 Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,B].	177
F.37 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,B]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	178
F.38 Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,A]: $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].	178
F.39 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,B].	179
F.40 Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,A].	179
G.1 Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58]. .	182
G.2 Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58]. .	183
G.3 Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58]. .	183
G.4 Tensões tangenciais devidas à torção uniforme e área A_m limitada pela linha média da espessura da secção fechada.	186
G.5 Quadro de caracterização da curva de encurvadura para secções tubulares [58]. .	191
G.6 Comprimento de encurvadura L_{cr} no plano de encurvadura considerado [58]. . .	191
H.1 Distância d_{LN} à linha neutra.	194

Índice de Tabelas

3.1	Valores de c_p e de c_f para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com EC1 [27].	40
3.2	Coeficientes de pressão resultante para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10 [28].	42
3.3	Parâmetros para cada categoria de terreno.	45
3.4	Coeficientes de pressão c_{p1} e c_{p2} para $\theta = 45^\circ$	49
4.1	Dimensões da estrutura do seguidor solar.	54
4.2	Dimensões do grupo coluna e cabeça do seguidor.	55
4.3	Valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão de rotura à tracção, f_u [58].	63
4.4	Valores de cálculo de outras propriedades do aço estrutural [58].	63
4.5	Pressão do vento sobre a superfície do seguidor solar, $p = q(h) \cdot G \cdot c_p$ [kN/m ²]. .	74
4.6	Valor das constantes k_1 , k_2 e k_3 associadas às componentes \bar{F}_i , $\tilde{F}_i(t)$, e $\check{F}_i(t)$ da força do vento nos nós i dos perfis C.	84
4.7	Valor das constantes k_1 , k_2 e k_3 associadas às componentes \bar{F}_i , $\tilde{F}_i(t)$, e $\check{F}_i(t)$ da força do vento nos nós i dos perfis OM.	85
5.1	Esforços internos máximos nos perfis C ₁ e C ₂	92
5.2	Esforços internos máximos nos perfis OM ₁ , OM ₆ , OM ₇ e OM ₁₂	92
5.3	Esforços internos máximos na viga V1.	93
5.4	Esforços internos máximos na viga V2.	93
5.5	Esforços internos máximos nas vigas V3.	94

Índice de Tabelas

5.6	Esforços internos máximos nos tubos facar.	94
5.7	Esforços internos máximos na coluna pequena.	95
5.8	Esforços internos máximos na coluna grande.	95
5.9	Deslocamentos nodais [m] do ponto Q da coluna pequena.	98
5.10	Deslocamentos nodais [m] da malha metálica (Perfis C e OM).	99
5.11	Classificação das secções transversais de acordo com EC3-1-1.	101
5.12	Verificação da segurança da secção dos perfis C aos esforços da combinação [P,B].	101
5.13	Verificação da segurança da secção dos perfis OM aos esforços da combinação [P,B].	101
5.14	Verificação da segurança da secção IPE 240 da viga V1 aos esforços da combinação [P,B].	102
5.15	Verificação da segurança da secção IPE 240 da viga V2 aos esforços da combinação [P,A].	102
5.16	Verificação da segurança da secção IPE 240 da viga V3 aos esforços da combinação [P,B].	102
5.17	Verificação da segurança da secção Ø559 mm da CP aos esforços N_{Ed} e $V_{z,Ed}$ da combinação [P,A] e $M_{y,Ed}$ da combinação [S,B].	103
5.18	Verificação da segurança da secção Ø772 mm da CG aos esforços da combinação [P,A].	103
5.19	Verificação da segurança da secção 300×200×8 mm aos esforços da combinação [P,A].	104
5.20	Verificação da segurança da secção 300×200×8 mm aos esforços da combinação [S,B].	104
5.21	Valores de $F_{v,Rd}$ e $F_{t,Rd}$, segundo EC3-1-8, dos parafusos M12, M16 e M20. . . .	106
A.1	Características geométricas do perfil U.	123
A.2	Propriedades da secção transversal U.	123
A.3	Propriedades da secção transversal OM.	124
A.4	Características geométricas da secção IPE 240.	124
A.5	Propriedades da secção transversal IPE 240.	124
A.6	Propriedades da secção transversal L203×152×25,4 mm.	125
A.7	Propriedades da secção transversal do tubo rectangular 300×200×8 mm.	125
A.8	Propriedades da secção composta por três tubos rectangulares 300×200×8 mm. .	126
A.9	Propriedades da secção tubular rectangular 50×50 mm.	126
A.10	Propriedades da secção tubular circular Ø559 mm.	127
A.11	Propriedades da secção tubular circular Ø762 mm.	127

C.1	Valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$ [28].	136
C.2	Categorias e parâmetros de terreno [28].	137
D.3	Valores máximos e mínimos das séries temporais obtidas através do programa Matlab.	151
G.1	Factores de imperfeição para as curvas de encurvadura [58].	190

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

AR	<i>Auto regressive</i> (auto regressivo)
ARMA	<i>Auto regressive moving average</i> (auto regressivo de média móvel)
ASCE	ASCE/SEI 7-10
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i> (dinâmica computacional de fluidos)
CLA	Camada limite atmosférica
CG	Coluna grande
CP	Coluna pequena
CS	Cabeça do seguidor
EC0	Eurocódigo 0
EC1	Eurocódigo 1
EC3	Eurocódigo 3
ELU	Estados limites últimos
FFT	<i>Fast fourier transform</i> (transformada rápida de Fourier)
GF	<i>Gust factor</i> (factor de rajada da pressão dinâmica do vento)
GLF	<i>Gust loading factor</i>
LN	Linha neutra
POD	<i>Proper orthogonal decomposition</i>
TF	Tubos facar
UE	União Europeia
UR	Unidade de rotação
WAWS	<i>Weighted amplitude wave superposition</i> (método de decomposição espectral)

Siglas

UNL	Universidade Nova de Lisboa
-----	-----------------------------

Índices

$()_{Ed}$	valor actuante de cálculo
$()_{el}$	valor elástico
$()_f$	força
$()_i$	relativo ao nó i
$()_p$	pressão
$()_{pl}$	valor plástico
$()_{Rd}$	valor resistente de cálculo
$()_{ref}$	referência
$()_t$	relativo à velocidade transversal do vento
$()_T$	relativo ao período de tempo T
$()_v$	relativo à velocidade longitudinal do vento
$()_V$	velocidade de rajada
$()_w$	relativo à velocidade vertical do vento
$()_x$	relativo ao eixo x
$()_y$	relativo ao eixo y
$()_z$	relativo ao eixo z
$()_\tau$	relativo ao período de tempo τ

Letras Latinas Maiúsculas

A	área da secção transversal
A_a	“área de abrigo”
A_B	soma da área projectada, num plano normal à direcção do vento, dos seguidores solares e dos muros/vedações interiores e exteriores
A_F	área total projectada no solo de todos os obstáculos incluídos no cálculo de A_B
$A_{m/v}$	área projectada, num plano normal à direcção do vento, dos muros/vedações
A_o	área projectada, num plano normal à direcção do vento, dos seguidores solares
A_{ref}	área de referência da superfície da estrutura
A_s	área da secção resistente
$A_{v,y}$	área resistente ao esforço transversal segundo a direcção y
$A_{v,z}$	área resistente ao esforço transversal segundo a direcção z
A_w	área de uma alma
B	largura da estrutura (dimensão medida na perpendicular à direcção do vento)

$C_{x,y,z}$	coeficientes de decaimento exponencial segundo as direcções x , y e z
E	módulo de elasticidade
\bar{F}	força média do vento
\hat{F}	força de pico do vento
F_D	força de arrasto
F_L	força de sustentação
$F_{t,Ed}$	valor de cálculo do esforço de tracção por parafuso
$F_{t,Rd}$	valor de cálculo da resistência à tracção por parafuso
$F_{v,Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal por parafuso
$F_{v,Rd}$	valor de cálculo da resistência ao esforço transversal por parafuso
G	coeficiente estrutural
G_a	módulo de distorção
G_k	valor característico das acções permanentes
$G_q^T(T)$	<i>factor de rajada para a pressão dinâmica do vento</i> ou factor de rajada GF
$G_v^T(T)$	factor de rajada
H	altura total da estrutura
$H_{m/v}$	altura dos muros ou vedações
$H(f_n)$	matriz triangular inferior
I_y	momento de inércia em relação ao eixo y-y
I_z	momento de inércia em relação ao eixo z-z
I_v	intensidade de turbulência
Q	coeficiente de fundo da resposta
Q_k	valor característico das acções variáveis
L	comprimento da estrutura (dimensão medida na perpendicular à direcção do vento)
L_{cr}	comprimento de encurvadura
L_v	escala de turbulência
$M_{N,Rd}$	valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, reduzidos pela interacção com o esforço axial
$M_{pl,y,Rd}$	valor de cálculo do momento flector plástico resistente, em relação ao eixo y-y
$M_{pl,z,Rd}$	valor de cálculo do momento flector plástico resistente, em relação ao eixo z-z
M_t	momento torsor resultante da interacção “vento-estrutura”
$M_{V,Rd}$	valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, reduzidos pela interacção com os esforços transversos

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

$M_{y,Ed}$	valor de cálculo do momento flector actuante, em relação ao eixo y-y
$M_{z,Ed}$	valor de cálculo do momento flector actuante, em relação ao eixo z-z
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal actuante
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal plástico resistente
R	coeficiente de resposta em ressonância
R_v	função de autocorrelação
R_{vv}	função de correlação cruzada
S_L	função de densidade espectral de potência adimensional
S_v	função de densidade espectral de potência
S_{vv}	função de densidade espectral de potência cruzada
$S(f_n)$	matriz de densidade espectral cruzada
T	intervalo de medição da velocidade média
T_{Ed}	valor de cálculo do momento torsor actuante
T_{Rd}	valor de cálculo do momento torsor resistente
$T_{t,Ed}$	valor de cálculo do momento torsor de St. Venant actuante
$T_{w,Ed}$	valor de cálculo do não uniforme (empenamento)
V	velocidade de rajada de 3 s de duração a 10 m acima de um terreno do tipo campo aberto
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal actuante
$V_{pl,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal plástico resistente
$V_{pl,T,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal plástico resistente, reduzido pela interação com o momento torsor
$W_{el,y}$	módulo de flexão elástico da secção transversal segundo os eixo y-y
$W_{el,z}$	módulo de flexão elástico da secção transversal segundo os eixo z-z
$W_{pl,y}$	módulo de flexão plástico da secção transversal segundo os eixo y-y
$W_{pl,z}$	módulo de flexão plástico da secção transversal segundo os eixo z-z

Letras Latinas Minúsculas

b	largura da secção transversal
\bar{b}	parâmetro dependente da categoria do terreno para a obtenção de \bar{v}
c	parâmetro dependente da categoria do terreno para a obtenção de I_v
c_{dir}	coeficiente de direcção
c_D	coeficiente de força de arrasto
c_e	coeficiente de exposição

c_f	coeficiente aerodinâmico de força global
c_o	coeficiente de orografia
c_p	coeficiente aerodinâmico de pressão resultante
c_r	coeficiente de rugosidade
c_{season}	coeficiente de sazão
d	altura de uma parte recta da alma
f	frequência
f_L	frequência adimensional
f_n	frequência fundamental de vibração da estrutura
f_y	tensão de cedência
$f_{y,b}$	tensão de cedência de um parafuso
f_u	tensão de rotura à tracção
$f_{u,b}$	tensão de rotura à tracção de um parafuso
g_v	factor de pico
h	altura média da estrutura
h_w	altura da alma
i	raio de giração
k	constante de von Kármán
k_p	factor de pico da resposta
k_r	coeficiente do terreno segundo EC1
k_I	coeficiente de turbulência segundo EC1
n	relação entre os valores de cálculo dos esforços normais actuante e plástico resistente de uma secção transversal
p	pressão do vento sobre a superfície da estrutura
p_s	pressão do vento na superfície superior dos painéis fotovoltaicos
p_i	pressão do vento na superfície inferior dos painéis fotovoltaicos
q	pressão dinâmica do vento
\bar{q}	pressão média do vento
q_b	pressão dinâmica de referência
r	raio entre os banzos e a alma de um perfil de aço
t	tempo
t_f	espessura do banzo do perfil de aço
t_w	espessura da alma do perfil de aço
v	velocidade do vento

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

\bar{v}	velocidade média do vento
\tilde{v}	velocidade flutuante do vento
v_b	valor de referência da velocidade do vento
$v_{b,0}$	valor característico da velocidade média do vento
v_*	velocidade de fricção
z	altura acima do solo
z_0	comprimento de rugosidade
$z_{0,II}$	comprimento de rugosidade de um terreno de categoria II segundo EC1
z_g	altura da camada limite atmosférica (altura gradiente)
z_{min}	altura mínima, para cálculo de z_s , dependente da categoria do terreno
z_{ref}	altura de referência para determinação da velocidade
z_s	altura de referência para determinação do coeficiente estrutural

Letras Gregas Maiúsculas

$\Lambda(f_n)$	matriz dos valores próprios
Φ	valor para determinar o coeficiente de redução χ
$\Psi(f_n)$	matriz dos vectores próprios

Letras Gregas Minúsculas

α	expoente da função de potência \bar{v} dependente da categoria do terreno
$\bar{\alpha}$	expoente da função de potência \bar{v} segundo a ASCE dependente da categoria do terreno
α_c	parâmetro que representa a zona comprimida de parte de uma secção transversal
α_d	parâmetro para tomar em consideração o efeito da flexão desviada
α_i	factor de imperfeição
β	parâmetro dependente da categoria do terreno para cálculo do desvio padrão
χ	coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado
β_d	parâmetro para tomar em consideração o efeito da flexão desviada
ϵ	coeficiente dependente de f_y
ϕ	ângulo de fase aleatório
γ_G	coeficiente parcial de segurança relativo às acções permanentes
γ_{Mi}	coeficiente parcial de segurança

γ_Q	coeficiente parcial de segurança relativo às acções variáveis
θ	ângulo de inclinação
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada
λ_1	valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada
$\lambda(f_n)$	valores próprios
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico
θ	ângulo de inclinação de coberturas isoladas de uma vertente/seguidores solares
ω	frequência angular
θ	ângulo de fase
ρ	densidade do ar
ρ_a	massa volúmica do aço
ρ_v	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, tendo em conta a interacção com os esforços transversos
ρ_{vv}	coeficiente de correlação cruzado
σ	tensão
σ_v	desvio padrão da turbulência
τ	intervalo de tempo praticamente instantâneo
τ_{Ed}	valor de cálculo da tensão tangencial actuante
$\tau_{t,Ed}$	valor de cálculo das tensões tangenciais actuantes devidas à torção de St. Venant actuante
τ_0	tensão exercida pelo ar na superfície do terreno
ψ	ângulo de rotação do zeguidor solar
$\psi(f_n)$	vectores próprios

Outros

$\bar{\epsilon}$	expoente da função L_v
ℓ	parâmetro multiplicativo de L_v dependente da categoria do terreno

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

Com as novas directivas da União Europeia (UE) que, até 2020, exigem a diminuição do consumo das energias convencionais, redução das taxas de emissão de dióxido de carbono e o aumento da eficiência energética, verificou-se, nos últimos anos, um crescimento acentuado do sector das energias renováveis, nomeadamente as energias eólica e solar. Em torno do crescente interesse por este tipo de energia desenvolveu-se toda uma indústria necessária à sua exploração. A exploração da energia solar em grande escala é realizada em centrais fotovoltaicas nas quais os painéis fotovoltaicos são fixados em estruturas metálicas denominadas de seguidores solares.

A meta de produção, até 2020, de energia eléctrica por fontes renováveis, imposta a Portugal pela UE [1], obriga que o peso de “energias limpas” em relação ao total da energia eléctrica produzida seja em 2008, 2010 e 2020, respectivamente, 43%, 45% e 59%. Para cumprir este objectivo o país apostou, essencialmente, no aumento da produção da energia eléctrica a partir das energias eólica e solar. Em relação a esta última, foram feitos grandes investimentos na instalação de novas centrais fotovoltaicas, das quais se destaca a Central Solar Fotovoltaica da Amareleja, uma das maiores a nível mundial. Esta Central, a funcionar desde 23 de Dezembro de 2008, está instalada na freguesia da Amareleja, concelho de Moura, considerada a “terra mais quente de Portugal”, devido aos recordes de temperatura máxima registados no verão. Do aproveitamento da energia solar nesta Central é gerada uma potência anual que permite abastecer cerca de trinta mil lares.

A Central Fotovoltaica da Amareleja [2] é dotada de dois mil e quinhentos seguidores solares idênticos, com cento e quatro painéis cada, distribuídos ao longo de duzentos e cinquenta

hectares, programados para acompanhar automaticamente a trajectória do sol de modo a otimizar a produção de energia. A Central da Amareleja é um investimento do grupo empresarial espanhol *Acciona* [3], líder mundial no mercado de desenvolvimento das energias renováveis. A manutenção da Central está a cargo da sua filial portuguesa, a empresa *Amper Central Solar, SA*. Toda a estrutura metálica dos seguidores solares implantados foi concebida pela empresa, também espanhola, *STi norland* [4]. A instalação dos painéis fotovoltaicos foi da responsabilidade da empresa chinesa *Yingli Solar* [5].

Estando associados à instalação de uma central fotovoltaica montantes de investimento extremamente elevados, reveste-se da maior importância a avaliação da sustentabilidade das estruturas dos seguidores solares. Estas estruturas estão sujeitas a um conjunto de acções de natureza diversa, nomeadamente, peso próprio, acção sísmica, vento, neve e chuva, sendo, no entanto, a acção do vento a mais condicionante no seu dimensionamento [6, 7].

A acção do vento sobre os seguidores solares é uma área de estudo relativamente recente que tem vindo a desenvolver-se na última década. A bibliografia publicada relativa a esta matéria é ainda limitada. Isto deve-se ao facto da implantação de centrais fotovoltaicas, a nível mundial, ser relativamente recente e de muita da investigação realizada ser feita no âmbito de empresas, que não divulgam os estudos efectuados.

Relativamente à acção do vento em seguidores solares, a maioria dos estudos existentes baseia-se em ensaios realizados em túnel de vento ou em métodos numéricos enquadrados no domínio da dinâmica computacional de fluidos (programas *CFD- computational fluid dynamics*) [8, 9]. Por conduzirem a resultados que se aproximam mais da realidade, os ensaios do protótipo dos seguidores solares em túnel de vento são a forma mais fidedigna de estudar o comportamento do vento neste tipo de estruturas, no contexto das centrais fotovoltaicas, onde os movimentos de ar são difíceis de prever. A técnica CFD [10] apresenta ainda algumas limitações na representação dos fenómenos reais e, devido às hipóteses simplificativas que lhe estão subjacentes, carece normalmente da validação dos resultados, por comparação com os obtidos em ensaios em túneis de vento.

Dos estudos sobre a acção do vento em seguidores solares em túnel de vento destacam-se os efectuados por Peterka *et al.* [11-14]. Estes autores, através dos referidos ensaios práticos, procuraram definir a acção média e de pico do vento em seguidores solares isolados ou inseridos em centrais fotovoltaicas. O estudo efectuado teve o intuito de analisar a redução da acção do vento em seguidores no interior das centrais fotovoltaicas, em relação aos dispostos na periferia destas. Os referidos autores procuraram representar os resultados obtidos em termos

de factores de redução da acção do vento, que traduzem o efeito de protecção ao vento, designado de “efeito de abrigo”, que uns seguidores conferem aos outros.

Ao contrário do que sucede com os edifícios e outras obras de Engenharia Civil, no caso particular dos seguidores solares não existe nenhum documento normativo que regule o seu dimensionamento em face da acção do vento. Por este facto, os engenheiros que concebem este tipo de estruturas, sempre que não lhes é possível recorrer a ensaios em túnel de vento, têm procurado fazer uma adaptação, ao caso dos seguidores solares, das normas em vigor para o projecto de Engenharia Civil. Com o intuito de averiguar a validade do procedimento referido, têm sido realizados vários estudos [15, 16, 17] que contemplam seguidores solares localizados quer na periferia quer no interior de centrais fotovoltaicas. David Banks [15, 16] é responsável por vários estudos sobre as particularidades da aplicação da norma americana ASCE/SEI 7-10 aos seguidores solares. Segundo este autor, a aplicação das directrizes da referida norma é mais aconselhável para seguidores solares dispostos nas periferias das centrais. Mohapatra, S. [18] concluiu também que a norma ASCE/SEI 7-10 conduz, no caso dos seguidores da periferia de uma central, a pressões de pico equiparáveis às que se obtêm em ensaios em túnel de vento.

Em alternativa à utilização de normas e regulamentos de Engenharia Civil, alguns autores, dos quais se destacam Miller e Zimmerman [19] e Wang [20], para prever as acções do vento sobre o seguidor solar, fizeram uso de técnicas de simulação numérica da velocidade do vento.

Com vista ao estudo dos efeitos da acção do vento sobre os seguidores solares da Central Fotovoltaica da Amareleja, recorreu-se, na presente dissertação, ao uso de normas em vigor, e a métodos numéricos, à semelhança do que foi seguido por alguns autores.

1.2 Objectivos

O trabalho realizado no âmbito da presente dissertação tem como principal objectivo analisar os efeitos da acção do vento no seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja, tendo por base a adopção de dois métodos alternativos para quantificar a acção do vento: aplicação das directrizes da norma americana ASCE/SEI 7-10 (ASCE), admitindo que o seguidor solar se comporta como uma *cobertura isolada de uma vertente* inclinada a 45° ; simulação numérica da componente flutuante da velocidade, de modo a calcular as forças do vento variáveis no tempo sobre o seguidor solar.

Para os esforços obtidos pretende-se verificar a resistência do seguidor solar aos Estados Limites Últimos (ELU) e averiguar se as deformações ao nível da estrutura metálica não comprometem a integridade dos painéis fotovoltaicos.

1.3 Organização da dissertação

A apresentação da presente dissertação desenvolveu-se ao longo de seis capítulos, fazendo-se no primeiro algumas breves considerações acerca do desenvolvimento das energias renováveis em Portugal e da problemática da determinação da acção do vento em seguidores solares.

No capítulo 2 descrevem-se alguns dos conceitos básicos da teoria do vento, em particular os que estão associados à determinação da acção do vento sobre estruturas. São apresentadas duas abordagens do método WAWS que permitem simular numericamente a velocidade flutuante do vento.

No capítulo 3 são feitas algumas considerações sobre a problemática de redução da acção do vento em seguidores solares inseridos em centrais fotovoltaicas e é discutida a aplicabilidade dos regulamentos e normas do projecto de estruturas de Engenharia Civil ao caso dos seguidores solares. No seguimento desta discussão é justificada a necessidade de utilizar a norma americana ASCE/SEI 7-10, em alternativa à norma em vigor em Portugal e no resto da Europa, o Eurocódigo 1. São ainda apresentadas as directrizes da norma ASCE/SEI 7-10 no que concerne à determinação da acção do vento.

No capítulo 4 é descrita a estrutura metálica do seguidor solar da Cental Fotovoltaica da Amareleja e proposto um modelo estrutural de análise. Este capítulo inclui ainda as definições da acção do vento por meio da norma ASCE/SEI 7-10 e de forças variáveis no tempo, simuladas numericamente em Matlab através do método WAWS.

No capítulo 5 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, concretamente os esforços e deformações na estrutura do seguidor solar, provenientes das análises estática e dinâmica efectuadas no programa SAP2000. Para os esforços obtidos são feitas as devidas verificações de segurança da estrutura aos Estados Limites Últimos e para as deformações verificadas é analisada a sua influência na integridade dos painéis fotovoltaicos.

Por último, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões do trabalho realizado e algumas perspectivas de desenvolvimento futuro do mesmo.

Capítulo 2

Acção do Vento

Em geral, o estudo dos efeitos dinâmicos do vento sobre uma estrutura processa-se nas seguintes etapas: caracterização do vento, descrição das propriedades aerodinâmicas da estrutura e combinação destes factores para a determinação da resposta da estrutura. O tratamento do fenómeno aleatório do vento e da sua interacção com as estruturas requer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo várias áreas científicas tais como meteorologia, probabilidade e estatística, dinâmica de fluidos e dinâmica estrutural estocástica. Neste capítulo entrar-se-á com a contribuição de algumas destas áreas para a descrição das características da velocidade do vento e a determinação da acção deste sobre estruturas.

Com base na teoria dos processos estocásticos são definidas, neste capítulo, algumas propriedades estatísticas que permitem caracterizar o comportamento aleatório, no tempo e no espaço, da velocidade do vento. Para definir a componente da velocidade do vento associada à turbulência deste, são apresentadas, com base no método WAWS, duas simulações numéricas distintas. A geração de séries temporais da velocidade do vento, obtidas por meio deste método, é especialmente importante quando se pretende definir a acção dinâmica do vento (variável no tempo e no espaço) sobre estruturas.

Finalmente, faz-se uma breve referência à determinação da acção do vento sobre uma estrutura, em que se introduz o conceito de força estática equivalente, sustentado pelo método GLF (iniciais de *Gust Loading Factor*). Este é o método adoptado nos principais códigos mundiais de dimensionamento de estruturas para a acção do vento.

2.1 Origem do vento

O vento atmosférico tem como origem o desigual aquecimento do ar na superfície terrestre. Em virtude deste, desenvolvem-se na atmosfera gradientes de pressão geradores das designadas forças de gradiente de pressão, as quais são responsáveis pelo movimento do ar das regiões de mais alta pressão para as de mais baixa pressão. Durante o seu trajecto, além das forças referidas, o ar experimenta ainda a influência da força fictícia de Coriolis, da força centrífuga, ambas devidas ao movimento de rotação da Terra, e da força de atrito. Esta última é de particular interesse, pois é responsável pelo regime de escoamento do ar junto da superfície terrestre.

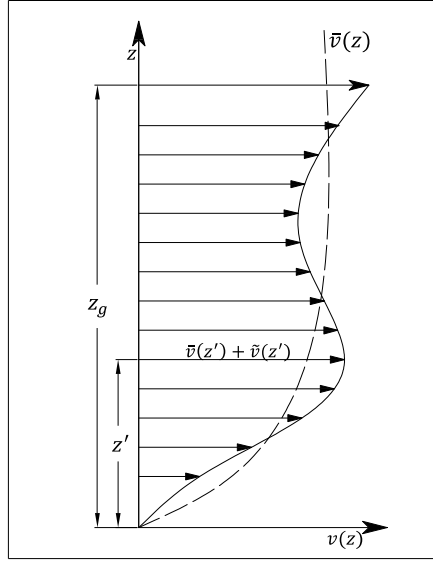
Ao nível da camada atmosférica, mais precisamente da troposfera, as forças de atrito resultantes da interacção do vento com a superfície terrestre tendem a diminuir a velocidade do vento na proximidade desta. A intensidade destas forças aumenta com a rugosidade do terreno, para a qual contribuem quer os obstáculos naturais, nomeadamente montanhas e vegetação, quer os obstáculos artificiais (edificações).

A influência do atrito no escoamento do ar diminui com a altura z acima do solo, deixando de se fazer sentir a partir de uma certa altura $z = z_g$. Segundo alguns autores [21], z_g assume valores que podem variar entre 600 m e 1000 m. A região da atmosfera de altura z_g é conhecida por camada limite atmosférica (CLA). Sendo esta a região onde são edificadas as construções de Engenharia Civil, é da maior importância o conhecimento das características do tipo de vento nela existente.

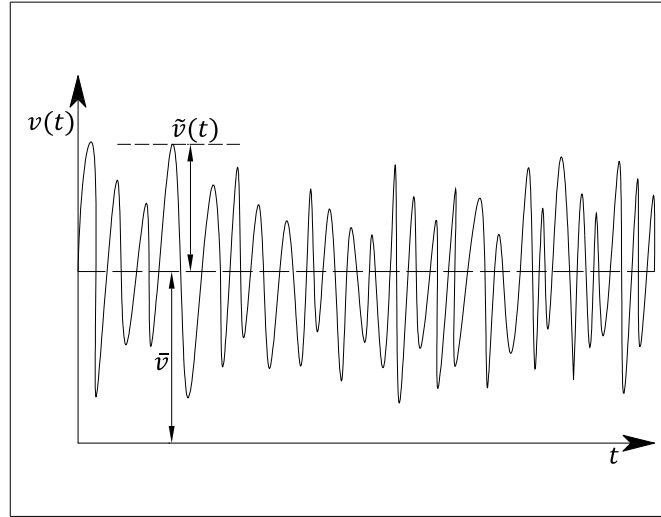
2.2 Caracterização do comportamento do vento

A camada limite atmosférica é uma região caracterizada por um escoamento turbulento do ar, responsável pela existência de flutuações aleatórias da velocidade do vento em torno de um valor médio.

A seguir apresentam-se dois gráficos que mostram o comportamento genérico da velocidade, v , do vento atmosférico: o gráfico da Figura 2.1(a) representa, num certo instante t , a forma como v se comporta quando cresce a altura z acima do solo; o gráfico da Figura 2.1(b) traduz o modo como, a uma determinada altura, z , v varia no decurso do tempo t .



(a) Registo de $v(z)$.



(b) Registo de $v(t)$.

Figura 2.1: Registo da velocidade do vento em função da altura z e do tempo t .

Da observação dos gráficos referidos verifica-se que a velocidade do vento em função de t , a uma certa altura z acima do solo, ou de z , num determinado instante t , apresenta em cada um dos casos flutuações aleatórias em torno de um valor médio. Analisando em particular o caso da variação temporal da velocidade do vento, à altura z , mostra-se que em termos de tratamento matemático, a função $v(z, t)$ é traduzida pela equação 2.1 que representa a soma de uma componente estacionária, $\bar{v}(z)$, correspondente à velocidade média do vento à altura z ,

Capítulo 2. Acção do Vento

e de uma componente $\tilde{v}(z, t)$, associada às flutuações da velocidade. Esta componente tem a designação de velocidade flutuante ou turbulenta do vento. Ao valor máximo de $v(z, t)$ observado num dado registo é dada a designação de velocidade de rajada ou de pico, V .

$$v(z, t) = \bar{v}(z) + \tilde{v}(z, t) \quad (2.1)$$

Em Engenharia do Vento, a velocidade do vento na camada limite atmosférica é representada pela soma da sua velocidade média, medida num intervalo de tempo T , compreendido entre 10 min e 1 h, com a da sua componente flutuante, registada em intervalos de tempo praticamente instantâneos, τ , de duração compreendida entre dois e três segundo [22].

É de notar que o valor $\tilde{v}(z, t)$ da relação 2.1 é o valor da componente da velocidade do vento \tilde{v}_v na direcção longitudinal x indicada na Figura 2.2. Esta é a direcção correspondente à da velocidade média do vento $\bar{v}(z)$. As outras duas componentes da velocidade vectorial do vento são a velocidade flutuante transversal, \tilde{v}_t , e a velocidade flutuante vertical, \tilde{v}_w .

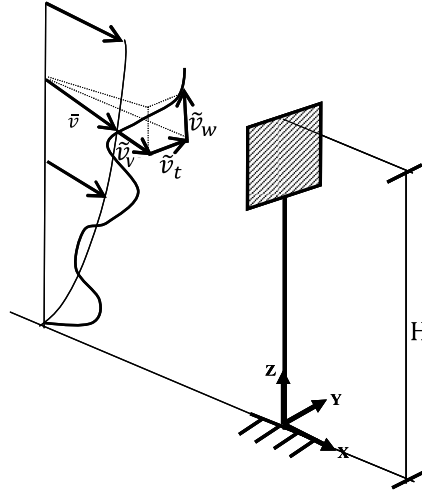


Figura 2.2: Componentes longitudinal (\tilde{v}_v), transversal (\tilde{v}_t) e vertical (\tilde{v}_w) da velocidade do vento [23].

De acordo com o referencial apresentado na Figura 2.2, define-se a velocidade longitudinal, transversal e vertical do vento num instante t , a uma altura z , do seguinte modo:

Velocidade longitudinal	(Direcção x)	$v_v = \bar{v}(z) + \tilde{v}_v(z; t)$
Velocidade transversal	(Direcção y)	$\tilde{v}_t = \tilde{v}_t(z; t)$
Velocidade vertical	(Direcção z)	$\tilde{v}_w = \tilde{v}_w(z; t)$

2.2. Caracterização do comportamento do vento

Na presente dissertação só será tomada em consideração a componente longitudinal da velocidade do vento e será omitido o índice v atribuído a esta componente. Assim, sempre que se fizer referência à velocidade do vento, $v(z, t)$, na verdade é o caso particular da componente longitudinal da velocidade do vento que se está a considerar.

2.2.1 Velocidade média do vento

A fim de representar o perfil vertical da velocidade média do vento na camada limite atmosférica têm sido desenvolvidas diversas expressões matemáticas. A primeira expressão surgida na literatura [21], com esse objectivo, é a função de potência expressa pela relação

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

em que $\bar{v}(z_{ref})$ representa o valor da velocidade média do vento medida a uma altura de referência, z_{ref} , acima do solo. Esta velocidade pode ser obtida através de anemómetros implantados no local em estudo. O factor α depende da rugosidade do terreno, sendo, unicamente, segundo Davenport [24], uma função da altura da CLA, z_g . De acordo com este autor, para os tipos de orografia indicados na Figura 2.3, α toma os valores: $\alpha = 0,40$ para centros de cidades ($z_g = 510$ m); $\alpha = 0,28$ para vilas, aldeias e zonas florestais ($z_g = 390$ m); $\alpha = 0,16$ para planícies sem vegetação ($z_g = 260$ m).

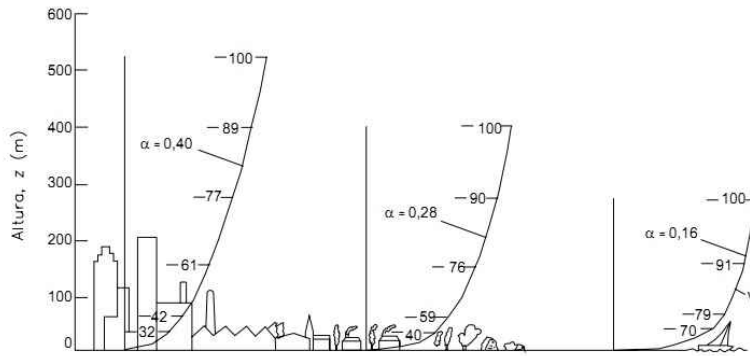


Figura 2.3: Perfil da velocidade média do vento para terrenos de diferentes rugosidades [25].

Simiu e Scanlan [21] definiram o perfil vertical da velocidade média do vento fazendo uso da relação logarítmica, a seguir apresentada, que é vulgarmente conhecida por lei de parede.

$$\bar{v}(z) = \frac{v_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.3)$$

Capítulo 2. Acção do Vento

Nesta expressão, $v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ é a velocidade de fricção, sendo τ_0 a tensão de corte superficial (tensão exercida pelo ar na superfície do terreno) e ρ , a densidade do ar; k é a constante de von Kármán cujo valor é aproximadamente igual a 0,4; z_0 é o designado comprimento de rugosidade do solo.

Actualmente existe um grande número de expressões para definir a variação em altura da velocidade média do vento. Os principais regulamentos a nível mundial adoptam expressões idênticas às duas anteriormente indicadas, diferindo, no entanto, em alguns parâmetros, entre os quais o intervalo de tempo em que a velocidade média do vento é medida.

As expressões da velocidade média do vento, $\bar{v}(z)$, presentes nas normas e regulamentos do projecto estrutural de Engenharia Civil podem ser traduzidas pela seguinte relação genérica [26]

$$\bar{v}(z) = v_b \cdot b \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

onde v_b é o valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de referência z_{ref} acima de um terreno do tipo campo aberto (planície sem vegetação); o parâmetro multiplicativo b , assim como α , tem valores que variam consoante as normas e os regulamentos.

No caso particular do Eurocódigo 1 (EC1) - *Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções do vento*, e da norma americana ASCE 7/SEI-10 (ASCE) - *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (Acções de Projecto para Edifícios e Outras Estruturas), a velocidade média do vento $\bar{v}(z)$ é determinada a partir de uma velocidade de referência, v_b , que é definida de modo diferente nas duas normas referidas. No caso do EC1 [27], v_b é a velocidade média do vento, correspondente a períodos de dez minutos ($T = 10$ min), medida a uma altura $z_{ref} = 10$ m acima de um terreno do tipo campo aberto. Para a norma ASCE [28], v_b representa uma velocidade de rajada de três segundos de duração ($\tau = 3$ s), a uma altura $z_{ref} = 10$ m acima de um terreno de tipo campo aberto. Em outras normas e regulamentos, concretamente nas normas australiana AS1170.2 e japonesa RLB-AIJ, v_b corresponde a uma velocidade média horária ($T = 1$ h), definida a uma altura $z_{ref} = 10$ m acima de um terreno do tipo campo aberto.

Por vezes é necessário conhecer a relação existente entre a velocidade de pico e a velocidade média do vento num registo de velocidade do vento. Este conhecimento torna-se particularmente importante no caso do estudo que é objecto da presente dissertação, uma vez que nele

2.2. Caracterização do comportamento do vento

se faz uso da norma ASCE e se tem em consideração os valores de referência da velocidade média do vento relativos ao nosso país, obtidos para $T = 10$ min.

Atendendo a que, em geral, se assume que a velocidade do vento segue uma lei de distribuição de probabilidade gausseana, pode estabelecer-se a relação entre a velocidade média do vento medida num certo intervalo de tempo T , \bar{v}_T , e a velocidade de rajada (velocidade de pico) relativa a um intervalo de tempo instantâneo τ (2 a 3 s de deuração), V_τ . Tendo em consideração o registo de velocidades da Figura 2.4, pode estabelecer-se a seguinte relação [29]

$$V_\tau = \bar{v}_T + g_v(\tau) \cdot \sigma_v \quad (2.5)$$

em que $g_v(\tau)$ é o factor de pico e σ_v o desvio padrão da amostra considerada.

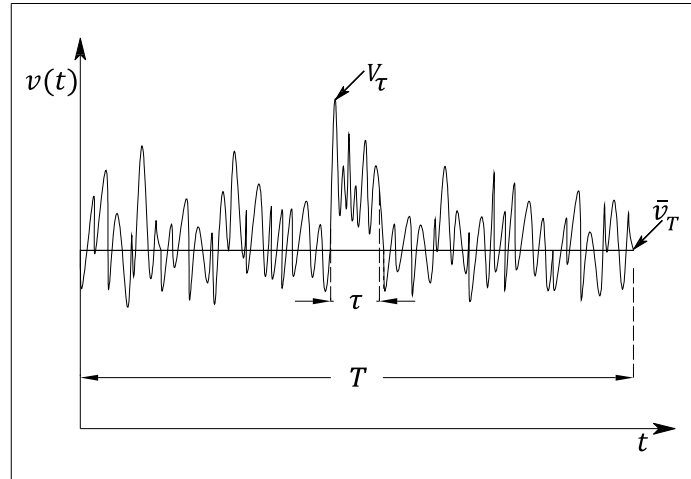


Figura 2.4: Velocidades médias temporais do vento \bar{v}_T e V_τ correspondentes a períodos de amostragem T e τ , respectivamente.

A razão entre a velocidade de rajada correspondente a τ segundos, V_τ , e a velocidade média no período T , \bar{v}_T , tem a designação de factor de rajada, $G_v^\tau(T)$.

$$G_v^\tau(T) = \frac{V_\tau}{\bar{v}_T} \quad (2.6)$$

O factor de rajada, cujo valor depende da rugosidade do solo e do intervalo de tempo T em que é calculada a velocidade \bar{v}_T , varia normalmente entre 1,3 e 2,5. Solari [30] propôs, para o cálculo desta grandeza, a relação genérica

$$G_v^\tau(T) = 1 + g_v(\tau) \cdot I_v(z) \cdot \sqrt{P_0(\tau)} \quad (2.7)$$

Capítulo 2. Acção do Vento

Nesta relação, o parâmetro $I_v(z)$, que representa a intensidade de turbulência, o parâmetro $P_0(\tau)$ e o factor de pico, $g_v(\tau)$, são definidos, respectivamente, pelas equações 2.13, 2.9 e 2.8.

$$g_v(\tau) = \left[1,175 + 2 \cdot \ln \left(\tilde{T} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_0}} \right) \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

O parâmetro P_1/P_0 desta última relação é obtido a partir das equações 2.10 e 2.11; o parâmetro $L_v(z)$ da equação 2.11 é a escala de turbulência, que é definida no parágrafo seguinte.

$$P_0(\tau) = \frac{1}{1 + 0,56 \cdot \tilde{\tau}^{0,74}} \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{P_1}{P_0} \right) = \frac{1}{31,25 \cdot \tilde{\tau}^{1,44}} \quad (2.10)$$

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau \cdot \bar{v}(z)}{L_v(z)} \quad (2.11)$$

$$\tilde{T} = \frac{T \cdot \bar{v}(z)}{L_v(z)} \quad (2.12)$$

2.2.2 Caracterização da turbulência do vento

Theodore von Kármán [31] definia o fenómeno da turbulência do vento como “flutuações irregulares da velocidade, governadas por um equilíbrio estatístico”. A ele se devem as primeiras tentativas de estudo matemático deste fenómeno.

A turbulência do vento, responsável pelo carácter flutuante da velocidade deste, tem a sua origem na sobreposição de inúmeros turbilhões de ar de diferentes tamanhos, duração e velocidades angulares. As dimensões e a duração dos turbilhões têm uma ordem de grandeza que pode variar do milímetro ao quilómetro e de fracções de segundo a hora, respectivamente. Segundo Kolmogorov [32], os turbilhões trocam entre si energia através de um processo de tipo cascata. Neste processo, os turbilhões de maiores dimensões transferem sequencialmente energia aos de menores dimensões, sendo a energia destes últimos dissipada, por atrito, em calor.

O estudo da variação da velocidade do vento, em função do tempo, num determinado local, e em função da altura acima do solo, num dado instante, é feito com base na teoria dos processos estocásticos, a qual se baseia na teoria das probabilidades. Os primeiros estudos que caracterizam estatisticamente as propriedades aleatórias da velocidade turbulenta do vento

datam de 1960 e foram da autoria de Davenport [24]. Segundo este, as flutuações da velocidade correspondem a um processo aleatório gausseano, estacionário, de média zero.

Entre os conceitos considerados importantes para caracterizar a velocidade turbulenta do vento figuram a intensidade de turbulência, as funções de autocorrelação e correlação cruzada, a escala de turbulência, e as função de densidade espectral e de densidade espectral cruzada. Estes conceitos serão apresentados nos parágrafos seguintes.

2.2.2.1 Intensidade de turbulência

Dryden e Kuethé [33] definiram, para cada uma das componentes da velocidade do vento (longitudinal, v , transversal, t , e vertical, w), a intensidade de turbulência, $I_i(z)$, como sendo o parâmetro estatístico dado pelo quociente entre o desvio padrão, associado à respectiva componente, e a velocidade média do vento.

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i}{\bar{v}_i(z)}; \quad \text{com } i = v, t, w \quad (2.13)$$

Na direcção longitudinal do vento, o desvio padrão σ_v é definido por $\sigma_v = \sqrt{\beta} \cdot v_*$, em que v_* é a velocidade de fricção e β o parâmetro que depende da categoria do terreno. Os desvios padrão relativos às velocidades transversal e vertical do vento relacionam-se com o desvio padrão correspondente à velocidade longitudinal do vento, respectivamente, pelas seguintes expressões: $\sigma_t \approx 0,75 \cdot \sigma_v$ e $\sigma_w \approx 0,5 \cdot \sigma_v$ [34].

2.2.2.2 Função de autocorrelação e de correlação cruzada

A função de autocorrelação de um processo estocástico é uma das funções mais importantes na análise das séries temporais uma vez que está relacionada com o conceito de função de densidade espectral de potência, que é definido em §2.2.2.4. Considerando o caso particular do processo $\tilde{v}(P; t)$, que representa a componente flutuante da velocidade do vento no ponto $P(x, y, z)$ e no instante t , define-se a função de autocorrelação [35] para este processo entre os instantes t e $t + \tau$, pela relação

$$R_v(t, t + \tau) = E[\tilde{v}(P; t) \cdot \tilde{v}(P; t + \tau)], \quad (2.14)$$

a qual traduz o valor esperado $E[\]$, ou média, do produto das variáveis $\tilde{v}(P; t)$ e $\tilde{v}(P; t + \tau)$. Em termos da teoria dos processos estocásticos esta média pode ser obtida a partir de um número N de registos da componente flutuante da velocidade do vento, $\tilde{v}_i(P; t)$, $i = 1, \dots, N$, pela relação

$$E[\tilde{v}(P; t) \cdot \tilde{v}(P; t + \tau)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i(P; t) \cdot \tilde{v}_i(P; t + \tau) \quad (2.15)$$

Atendendo a que $\tilde{v}(P; t)$ pode ser considerado um processo estacionário em sentido lato¹, a função de autocorrelação $R_v(t, t + \tau)$ é apenas função de τ e será designada por $R_v(\tau)$ [35].

Ao invés de $R_v(\tau)$ que num dado ponto mede a dependência entre a velocidade flutuante do vento num instante t e num instante $t + \tau$, a função de correlação cruzada $R_{vv}(\tau)$ avalia a relação existente entre a velocidade flutuante do vento $\tilde{v}(P; t)$ num ponto $P(x, y, z)$ e instante t e a velocidade $\tilde{v}(Q; t + \tau)$ num ponto $Q(x + r_x, y + r_y, z + r_z)$ e instante $t + \tau$.

A definição de $R_{vv}(\tau)$ é feita de um modo análogo à de $R_v(\tau)$. O valor desta função é o valor esperado do produto $\tilde{v}(P; t) \cdot \tilde{v}(Q; t + \tau)$, ou seja,

$$R_{vv}(\tau) = E[\tilde{v}(P; t) \cdot \tilde{v}(Q; t + \tau)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \tilde{v}_i(P; t) \cdot \tilde{v}_i(Q; t + \tau) \quad (2.16)$$

A função de correlação cruzada definida no domínio do tempo τ está intimamente ligada à função de densidade espectral cruzada, definida no domínio da frequência, f , cuja definição é dada em §2.2.2.5.

A quantificação do grau de correlação entre $\tilde{v}(P; t)$ e $\tilde{v}(Q; t + \tau)$ é dada pela grandeza $\rho_{vv}(\tau)$, designada de coeficiente de correlação cruzada. Visto a velocidade turbulenta do vento ser um processo de média nula, este coeficiente pode ser expresso em função de $R_{vv}(\tau)$, ou seja,

$$\rho_{vv}(\tau) = \frac{R_{vv}(\tau)}{\sigma_{v,P} \cdot \sigma_{v,Q}} \quad (2.17)$$

em que $\sigma_{v,P}$ e $\sigma_{v,Q}$ são, respectivamente, o desvio padrão das variáveis $\tilde{v}(P; t)$ e $\tilde{v}(Q; t + \tau)$, respectivamente. O coeficiente $\rho_{vv}(\tau)$ varia entre 0 e 1, aproximando-se da unidade à medida que a distância r entre os dois pontos se aproxima de zero.

2.2.2.3 Escala de turbulência

A escala de turbulência, $L_i (i = v, t, w)$, representa a dimensão média dos turbilhões do vento medida segundo cada um dos três eixos ortogonais x , y e z , associados às direcções longitudinal, v , transversal, t , e vertical, w , da velocidade do vento (Figura 2.2). No total, a escala de

¹Num processo estacionário em sentido lato, a sua média assume o mesmo valor independentemente do instante t considerado e a sua função de autocorrelação entre dois instantes t e $t + \tau$ depende apenas da diferença dos dois instantes, isto é, de τ [35].

2.2. Caracterização do comportamento do vento

turbulência $L_i (i = v, t, w)$ é definida por nove componentes [36]. Cada uma destas componentes é determinada com base no coeficiente de correlação cruzada ρ_{vv} , definido no parágrafo anterior, para o caso em que este depende apenas da distância espacial r entre os dois pontos P e Q, isto é, em que $\tilde{v}(P, t)$ e $\tilde{v}(Q, t + \tau)$ ocorrem simultaneamente no tempo ($\tau = 0$).

A escala de turbulência relativa à velocidade turbulenta do vento segundo a direcção longitudinal, L_v , é definida por três componentes, L_v^x , L_v^y e L_v^z , correspondentes aos eixos espaciais ortogonais x , y e z , respectivamente.

$$L_v^x = \int_0^\infty \rho_{vv}[P(x, y, z), Q(x + r_x, y, z)] dr_x \quad (2.18)$$

$$L_v^y = \int_0^\infty \rho_{vv}[P(x, y, z), Q(x, y + r_y, z)] dr_y \quad (2.19)$$

$$L_v^z = \int_0^\infty \rho_{vv}[P(x, y, z), Q(x, y, z + r_z)] dr_z \quad (2.20)$$

Entre L_v^x , L_v^y e L_v^z existem as seguintes relações: $L_v^y \approx 0,3 \cdot L_v^x$ e $L_v^z \approx 0,2 \cdot L_v^x$ [33].

2.2.2.4 Função de densidade espectral de potência

É usual descrever a velocidade turbulenta do vento na CLA no domínio da frequência f através da função de densidade espectral de potência, simplesmente designada de espectro de potência do vento.

A função de densidade espectral de potência está relacionada com dois conceitos matemáticos: função de autocorrelação, $R_v(\tau)$, e transformada de Fourier. Visto que \tilde{v} é um processo de média nula, verifica-se a condição de convergência (condição de Dirichelet) do integral [35]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |R_v(\tau)| d\tau < \infty \quad (2.21)$$

Nestas condições existe a transformada de Fourier de $R_v(\tau)$ a qual é expressa por

$$S_v(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_v(\tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} d\tau \quad (2.22)$$

$S_v(f)$ representa a função de densidade espectral de potência do processo $\tilde{v}(t)$.

A transformada inversa de Fourier de $S_v(f)$, definida pela expressão seguinte, é a função $R_v(\tau)$.

$$R_v(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v(f) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} df \quad (2.23)$$

As duas últimas relações traduzem o teorema de Wiener-Khintchine [35].

A variação com a frequência, f , da função $S_v(f)/\sigma_v^2$ é representada por uma curva com comportamento idêntico ao da que se mostra na Figura 2.5. Nesta figura pode identificar-se três regiões espectrais distintas, A, B e C, referentes à turbulência na CLA [37].

A zona A, de baixas frequências, corresponde à zona de formação de grandes turbilhões de carácter permanente. A zona B, denominada subintervalo inercial, é a região onde se situam os turbilhões que contêm a maior parte da energia cinética. Esta é a região onde ocorre a transferência de energia entre turbilhões por processos de tipo cascata. A zona C corresponde à energia de dissipação dos turbilhões de menores dimensões, sob a forma de calor.

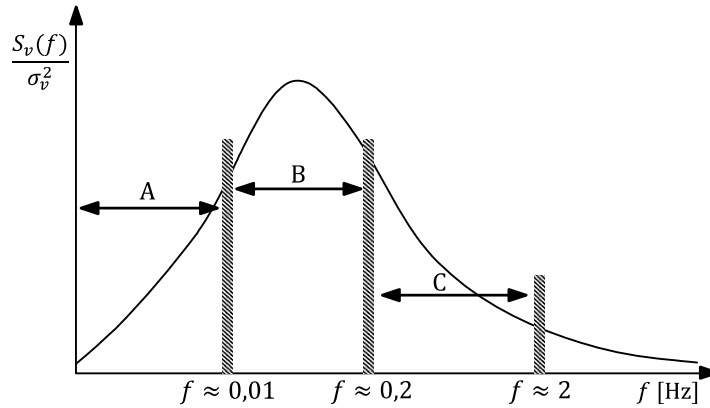


Figura 2.5: Curva de $S_v(f)/\sigma_v^2$ em função da frequência, f , mostrando as regiões distintas A, B e C [37].

A definição do espectro de potência do vento, $S_v(f)$, foi objecto de estudo de diversos autores durante o século passado. Entre os autores que estiveram nos primórdios da sua formulação destacam-se Davenport e Kaimal. O espectro de Kaimal, ainda hoje consagrado, está na base da expressão que define $S_v(f)$ segundo o Eurocódigo 1.

A fórmula de $S_v(f)$ segundo Davenport [24], a seguir apresentada, não entra em consideração com a dependência desta função com a altura z .

$$\frac{S_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{\frac{2}{3} \cdot f \cdot \left(\frac{L_v}{\bar{v}}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{f \cdot L_v}{\bar{v}}\right)^2\right]^{4/3}} \quad (2.24)$$

Nesta expressão, \bar{v} é a velocidade média do vento referida a períodos de dez minutos, medida a 10 m de altura acima do solo, e L_v a escala de turbulência, de valor constante igual a 1200 m. O uso do espectro de Davenport para frequências $f < 0,01$ Hz não é recomendado [38].

O espectro de Kaimal é definido em função da altura z acima do solo pela relação

$$\frac{S_v(f, z)}{\sigma_v^2} = \frac{6,868 \cdot \left(\frac{L(z)}{\bar{v}(z)}\right)}{\left[1 + \left(10,32 \cdot \frac{f \cdot L(z)}{\bar{v}(z)}\right)\right]^{5/3}} \quad (2.25)$$

em que $\bar{v}(z)$ representa a velocidade média relativa a períodos de dez minutos, medida à altura z , e $L_v(z)$ a escala de turbulência correspondente à mesma altura, expressa pela relação

$$L_v(z) = 300 \cdot \left(\frac{z}{300}\right)^{0,46+0,074 \cdot \ln(z_0)} \quad (2.26)$$

Actualmente, encontram-se na bibliografia inúmeras expressões representativas do espectro de potência do vento. Geralmente, essas expressões são concordantes na gama de frequências mais altas, mas apresentam algumas discrepâncias na gama de frequências mais baixas.

As diferentes normas e regulamentos do projecto estrutural de Engenharia Civil têm adoptado diferentes expressões para a função de densidade espectral de potência. Na Figura 2.6, para efeitos comparativos, mostra-se para a altura $z = 10$ m, as funções de densidade espectral de potência adimensional, $S_L(z, f) = S_v(f) \cdot f / \sigma^2$, em função da frequência, f , propostas por Davenport, Kaimal e as apresentadas no Eurocódigo 1 e na norma americana ASCE/SEI 7-10.

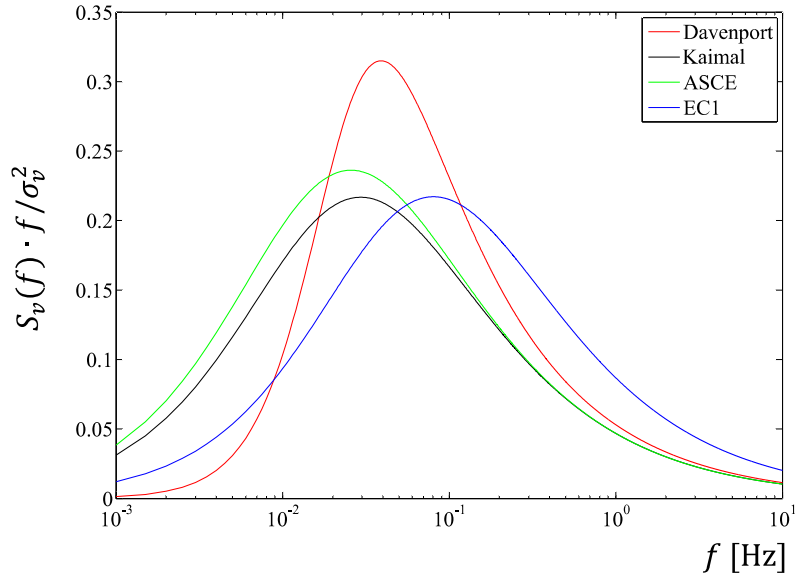


Figura 2.6: Funções de densidade espectral de potência adimensional propostas por Davenport, Kaimal, EC1 e ASCE.

A Figura 2.6 mostra que, como era esperado, o espectro de Davenport afasta-se bastante dos restantes, uma vez que este é definido independentemente da altura z . Como se pode observar nesta figura, no domínio de frequências entre 0,02 e 0,12 Hz, o referido espectro conduz, para cada frequência, a um valor de $S_L(z, f)$ superior ao que é obtido para os restantes espectros. Para uma frequência inferior a 0,06 Hz, o valor de $S_L(z, f)$ dado pela norma ASCE é maior do que o valor que deriva das fórmulas de Kaimal e de EC1. Para uma frequência superior a 0,06 Hz, o valor de $S_L(z, f)$ para EC1 é maior do que os de $S_L(z, f)$ obtidos a partir da ASCE e do espectro Kaimel para essa frequência. Acima de 0,12 Hz, o espectro de potência apresentado em EC1 conduz igualmente a valores superiores aos de Davenport.

2.2.2.5 Função de densidade espectral de potência cruzada

Para os processos $\tilde{v}(P, t)$ e $\tilde{v}(Q, t + \tau)$, a função de densidade espectral de potência cruzada, $S_{vv}(f)$, e a função de correlação cruzada, $R_{vv}(\tau)$, estão relacionadas pelo par de transformadas de Fourier [39]

$$S_{vv}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{vv}(\tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} d\tau \quad (2.27)$$

$$R_{vv}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{vv}(f) e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} df \quad (2.28)$$

2.2. Caracterização do comportamento do vento

A função de correlação cruzada $R_{vv}(\tau)$ não é necessariamente uma função par, pelo que a correspondente função de densidade espectral cruzada não é usualmente real. Nesta situação a função $S_{vv}(f)$ é representada por uma parte real $\Re\{\}$ e imaginária $\Im\{\}$, às quais usualmente se atribuem as designações de coespectro e quadratura, respectivamente. Atendendo que a parte imaginária, perante a parte real, tem um peso pequeno no valor de $S_{vv}(f)$, Davenport [24] desprezou a contribuição da parcela $\Im\{\}$ e definiu a função $S_{vv}(f)$ pela relação

$$S_{vv}(f) = \sqrt{S_v(z, f) \cdot S_v(z + r_z, f)} \cdot Coh(P, Q; f) \quad (2.29)$$

sendo $Coh(P, Q; f)$ a função de coerência entre os pontos P e Q da componente flutuante da velocidade do vento na direcção longitudinal e $S_v(z, f)$ e $S_v(z + r_z, f)$ as funções de densidade espectral relativas às alturas z e $z + r_z$, respectivamente.

O conceito de coerência foi introduzido pela primeira vez por Davenport em 1961. A função de coerência, $Coh(P, Q; f)$, avalia o grau de correlação entre as velocidades flutuantes $\tilde{v}(P)$ e $\tilde{v}(Q)$, nos pontos $P(x, y, z)$ e $Q(x + r_x, y + r_y, z + r_z)$, respectivamente. Esta função tende para zero à medida que a distância r entre os dois pontos aumenta e é igual à unidade quando $r = 0$. A função de coerência proposta por Davenport [24] é traduzida pela expressão

$$Coh(P, Q; f) = \exp\left(\frac{-f \cdot \sqrt{C_x^2 \cdot (r_x)^2 + C_y^2 \cdot (r_y)^2 + C_z^2 \cdot (r_z)^2}}{\frac{1}{2} \cdot [\bar{v}(z) + \bar{v}(z + r_z)]}\right) \quad (2.30)$$

em que C_x , C_y e C_z representam os coeficientes de decaimento exponencial segundo as direcções x , y e z , respectivamente. Para efeitos de dimensionamento é usual considerar que $C_x = C_y = C_z = 10$.

2.2.3 Simulação numérica da velocidade flutuante do vento

A simulação numérica da velocidade flutuante do vento é uma ferramenta muito utilizada quando se pretende estudar o comportamento dinâmico das estruturas sob a acção do vento turbulento. Esta temática tem sido objecto de análise da Engenharia do Vento nas últimas décadas. Entre os vários autores, que contribuíram para o seu desenvolvimento, destacam-se Shinozuka e Jan e Deodatis [40-43].

As flutuações da velocidade do vento, como já foi referido, traduzem a sobreposição dos inúmeros turbilhões num escoamento de ar. Cada movimento turbilhonar pode ser descrito como um movimento oscilatório harmónico de uma dada frequência.

Um dos métodos numéricos mais recorrentes para descrever a velocidade flutuante do vento consiste em simular esta por meio da soma de funções que traduzem movimentos harmónicos, de diferentes frequências e amplitudes, com ângulos de fase aleatórios. Este tratamento matemático é o fundamento do método WAWS, também designado de método de decomposição espectral. Este método admite duas abordagens distintas. Numa delas assume-se que há total correlação entre as velocidades flutuantes do vento nos diferentes pontos da superfície da estrutura. Nesta abordagem, as amplitudes das funções harmónicas que integram as séries temporais $v(t)$ são obtidas a partir da função de densidade espectral de potência, $S_v(z, f)$. Na outra abordagem, admite-se a possibilidade da não existência de correlação entre $\tilde{v}(t)$ nos diferentes pontos da superfície da estrutura. Neste caso a velocidade flutuante do vento $\tilde{v}(t)$ é simulada como se tratasse de um *processo estocástico multivariado*. Esta simulação recorre à decomposição da matriz de densidade espectral cruzada, que pode ser efectuada por meio de um dos seguintes métodos: a *decomposição de Cholesky* e a *decomposição POD* (abreviatura inglesa de *Proper Orthogonal Decomposition*). A decomposição da matriz de densidade espectral cruzada pelo método de Cholesky foi proposta por Shinozuka e Jan [42]. Este método é preterido em relação ao POD, uma vez que este último mostra-se igualmente eficiente e requer menor esforço computacional e tempo de processamento [44, 45].

No sentido de gerar, de forma mais eficiente, amostras de processos estocásticos, nas últimas duas décadas procurou-se desenvolver métodos alternativos ao WAWS. Entre eles destacam-se o método autoregressivo (AR) e o método autoregressivo de média móvel, ARMA (abreviatura inglesa de *Auto Regressive Moving Average*). Uma vez que na presente dissertação será utilizado o método WAWS na simulação de $\tilde{v}(t)$, não serão descritos os métodos AR e ARMA.

A seguir são apresentados alguns dos algoritmos de geração de amostras de processos estocásticos pelo método WAWS, aplicados ao caso particular de $\tilde{v}(t)$.

2.2.3.1 Método WAWS

A primeira abordagem do método WAWS, proposta por Shinozuka [40, 41], descreve a componente flutuante da velocidade do vento, $\tilde{v}(t)$, por meio do somatório de N funções harmónicas de diferentes frequências f_n , $n = 1, \dots, N$, e amplitudes, A_n , que são função da densidade espectral de potência, $S_v(z, f_n)$. Nesta abordagem pressupõe-se a existência de total correlação entre as velocidades flutuantes do vento nos diferentes pontos da superfície da estrutura.

Segundo Shinozuka, a velocidade flutuante do vento num instante t à altura z acima do solo, $\tilde{v}(z, t)$, é obtida pela expressão

$$\tilde{v}(z, t) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \phi_n) \quad (2.31)$$

em que ϕ_n é o ângulo de fase aleatório da função harmónica n , de valor compreendido entre $[0, 2\pi]$ rad, e A_n a amplitude da referida função, dada pela relação

$$A_n = \sqrt{2 \cdot S_v(z, f_n) \cdot \Delta f} \quad (2.32)$$

onde $\Delta f = \frac{f_N - f_1}{N-1}$ é o intervalo de frequência que se obtém dividindo a banda de frequência de interesse, de valores compreendidos entre f_1 e f_N , em $N - 1$ intervalos iguais de frequência, como se ilustra na figura seguinte.

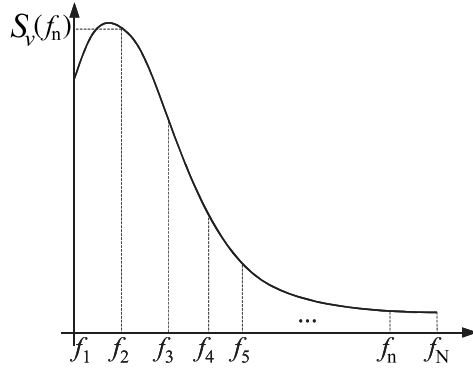


Figura 2.7: Definição do intervalo de frequência Δf da relação 2.32 [46].

A relação 2.31 pressupõe, como foi dito anteriormente, a existência de correlação das séries temporais da velocidade flutuante do vento nos vários pontos da superfície da estrutura em consideração. Todavia, se as dimensões desta forem relativamente grandes, a correlação referida pode não existir. Se ocorrer, por exemplo, um valor de pico da velocidade do vento no topo da estrutura, não significa que ele ocorra também na sua base. A existência ou a falta de correlação da velocidade flutuante do vento na superfície de uma estrutura está dependente do tamanho dos turbilhões de ar inerentes ao vento, em face da dimensão da referida superfície. Na análise da acção do vento em estruturas importa, portanto, fazer uma extensão do método anteriormente apresentado, no sentido de contemplar, adicionalmente, a possível falta de total correlação das flutuações da velocidade do vento na superfície dessas estruturas. A fim de satisfazer este objectivo, Shinozuka e Jan [42] propuseram um outro processo numérico para simular a velocidade flutuante do vento que contempla não só a correlação temporal, mas

Capítulo 2. Acção do Vento

também a espacial. Segundo esse processo, a velocidade flutuante do vento é descrita em M pontos do espaço pelo vector $\tilde{v}_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, M$, abaixo representado

$$\tilde{v}_j(t) = \begin{bmatrix} \tilde{v}_1(t) \\ \tilde{v}_2(t) \\ \vdots \\ \tilde{v}_M(t) \end{bmatrix}$$

A obtenção de $\tilde{v}_j(t)$, segundo esta nova abordagem de Shinozuka e Jan, requer a decomposição da matriz de densidade espectral cruzada $S(f_n) = [S_{v_j v_k}(f_n)]_{M \times M}$ a seguir representada.

$$S(f_n) = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_n) & S_{v_1 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_n) \\ S_{v_2 v_1}(f_n) & S_{v_2 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_n) \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_n) & S_{v_M v_2}(f_n) & \dots & S_{v_M v_M}(f_n) \end{bmatrix}$$

Os elementos $S_{v_j v_k}(f_n)$ ($j, k = 1, \dots, M$, $j \neq k$) são dados pela equação 2.33 e representam a densidade espectral cruzada para a frequência f_n dos processos $\tilde{v}_j(t)$ e $\tilde{v}_k(t)$ nos pontos $P_j(x_j, y_j, z_j)$ e $P_k(x_k, y_k, z_k)$, respectivamente. Os elementos diagonais, $S_{v_j v_j}(f_n)$ ($j, k = 1, \dots, M$, $j = k$), representam a densidade espectral de potência do processo $\tilde{v}_j(t)$, para a frequência f_n . Estes últimos elementos, definidos pela equação 2.34, obtêm-se de 2.33, considerando que a função de coerência, $Coh(P_j, P_j; f_n)$, tem valor unitário no caso em que $j = k$.

$$S_{v_j v_k}(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n) \cdot S_v(z_k, f_n)} \cdot Coh(P_j, P_k; f_n) \quad j, k = 1, \dots, M \quad (2.33)$$

$$S_{v_j v_j}(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n) \cdot S_v(z_j, f_n) \cdot \underbrace{Coh(P_j, P_j; f_n)}_{=1}} = S_v(z_j; f_n) \quad j = 1, \dots, M \quad (2.34)$$

Atendendo a que foram admitidas N frequências f_n , para gerar $\tilde{v}_j(t)$ será necessário definir N matrizes quadradas de dimensão $M \times M$, $S(f_n) = [S_{v_j v_k}(f_n)]_{M \times M}$, a seguir representadas.

$$S(f_n) = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_1) & S_{v_1 v_2}(f_1) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_1) \\ S_{v_2 v_1}(f_1) & S_{v_2 v_2}(f_1) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_1) \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_1) & S_{v_M v_2}(f_1) & \dots & S_{v_M v_M}(f_1) \end{bmatrix}_{n=1}$$

$$\begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_2) & S_{v_1 v_2}(f_2) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_2) \\ S_{v_2 v_1}(f_2) & S_{v_2 v_2}(f_2) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_2) \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_2) & S_{v_M v_2}(f_2) & \dots & S_{v_M v_M}(f_2) \end{bmatrix}_{n=2}$$

$$\begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_N) & S_{v_1 v_2}(f_N) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_N) \\ S_{v_2 v_1}(f_N) & S_{v_2 v_2}(f_N) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_N) \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_N) & S_{v_M v_2}(f_N) & \dots & S_{v_M v_M}(f_N) \end{bmatrix}_{n=N}$$

Figura 2.8: Representação das N matrizes $S(f_n)$.

A seguir apresentam-se os métodos de Cholesky e de POD de decomposição da matriz $S(f_n)$.

Decomposição de Cholesky

O modelo numérico proposto por Shinozuka e Jan [41] para simular a componente flutuante da velocidade do vento, admitindo a possível falta de total correlação desta componente nos pontos $j = 1, 2, \dots, M$, é traduzido pela série temporal

$$\tilde{v}_j(t) = \sum_{k=1}^j \sum_{n=1}^N |H_{jk}(f_{kn})| \cdot 2 \cdot \sqrt{\Delta f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{kn} \cdot t + \theta_{jk}(f_{kn}) + \phi_{kn}) \quad j = 1, \dots, M \quad (2.35)$$

Nesta expressão Δf é o intervalo de frequência considerado, ϕ_{kn} o ângulo de fase aleatório compreendido entre 0 e 2π rad e $H_{jk}(f_{kn})$ o elemento genérico da matriz triangular inferior $H(f_{kn}) = [H_{jk}(f_{kn})]_{M \times M}$, que é obtida a partir da relação 2.38 que traduz a decomposição de Cholesky da matriz de densidade espectral cruzada, $S(f_n)$. A grandeza $\theta_{jk}(f_{kn})$ é o ângulo de fase de $H_{jk}(f_{kn})$, definido pela relação

$$\theta_{jk}(f_{kn}) = \tan^{-1} \frac{\Im\{H_{jk}(f_{kn})\}}{\Re\{H_{jk}(f_{kn})\}} \quad (2.36)$$

Segundo Shinozuka, as frequências f_{kn} são dadas pela expressão

$$f_{kn} = \left(n + \frac{k}{M} - 1\right) \cdot \Delta f \quad n = 1, \dots, N. \quad (2.37)$$

A decomposição de Cholesky da matriz $S(f_n)$ é traduzida pela relação

$$S(f_n) = H(f_n) \cdot \bar{H}^T(f_n) \quad (2.38)$$

em que $\bar{H}^T(f_n)$ é a matriz transposta conjugada de $H(f_n)$.

A seguir apresenta-se o processo alternativo à decomposição de Cholesky, ou seja, o processo de decomposição POD.

Decomposição POD

A decomposição POD deve a sua origem a Loeve e Karhunen pelo que, muitas vezes, também é designada de decomposição Karhunen-Loeve. Armitz introduziu esta técnica na resolução de questões relacionadas com a turbulência do vento, tendo sido mais tarde usada, com idênticos objectivos, por muitos investigadores.

A decomposição POD [47-49] da matriz de densidade espectral cruzada, $S(f_n)$, baseia-se na determinação da matriz dos vectores próprios, $\Psi(f_n)$, e da matriz diagonal dos valores próprios, $\Lambda(f_n)$, a partir da relação

$$S(f_n) \cdot \Psi(f_n) = \Lambda(f_n) \cdot \Psi(f_n) \quad (2.39)$$

Desta relação resulta que

$$S(f_n) = \Psi(f_n) \cdot \Lambda(f_n) \cdot \Psi(f_n)^T \quad (2.40)$$

Os elementos da coluna j da matriz $\Psi(f_n)$ são os vectores próprios $\psi_j(f_n)$ e os elementos diagonais da matriz $\Lambda(f_n) = \text{diag}[\lambda_1(f_n), \lambda_2(f_n), \dots, \lambda_M(f_n)]$ são os valores próprios, $\lambda_j(f_n)$. Uma vez que a matriz $S(f_n)$ é uma matriz Hermiteana, os seus valores próprios são todos reais e positivos; os vectores próprios desta matriz são geralmente complexos [47-49].

A matriz dos vectores próprios satisfaz a seguinte condição de ortogonalidade

$$\Psi^T(f_n) \cdot \Psi(f_n) = I \quad (2.41)$$

em que I é a matriz identidade.

Por meio da decomposição POD o processo $\tilde{v}(t)$ é decomposto em M subprocessos $\tilde{v}_j(t) = \{\tilde{v}_1(t), \tilde{v}_2(t), \dots, \tilde{v}_M(t)\}^T$, tal que

$$\tilde{v}(t) = \sum_{j=1}^M Y_j(t) \quad (2.42)$$

sendo

$$Y_j(t) = 2 \cdot \sqrt{\Delta f} \sum_{n=1}^N \psi_j(f_n) \cdot \sqrt{\lambda_j(f_n)} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \theta_j(f_n) + \phi_n) \quad (2.43)$$

Nesta última expressão, ϕ_n representa o ângulo de fase aleatório com valores situados no intervalo $[0, 2\pi]$ rad e $\theta_j(f_n)$ o ângulo de fase do vector próprio complexo $\psi_j(f_n) = |\psi_j(f_n)| \cdot e^{i \cdot \theta_j(f_n)}$, determinado por

$$\theta_j(f_n) = \tan^{-1} \frac{\Im\{\psi_j(f_n)\}}{\Re\{\psi_j(f_n)\}} \quad (2.44)$$

Em muitos casos, os vectores próprios são reais devido ao facto das funções de densidade espectral serem reais e positivas. Neste caso a equação 2.43 pode ser simplificada e substituída pela abaixo indicada.

$$\tilde{v}(t) = 2 \cdot \sqrt{\Delta f} \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \psi_j(f_n) \cdot \sqrt{\lambda_j(f_n)} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \phi_n) \quad (2.45)$$

A seguir apresenta-se uma outra expressão alternativa à anterior, resultante da decomposição POD, para representar $\tilde{v}(t)$ [23].

$$\tilde{v}(t) = 2 \cdot \sqrt{\Delta f} \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \psi_j(f) \cdot \sqrt{\lambda_j(f)} \cdot [R_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t) - I_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t)] \quad j = 1, \dots, M \quad (2.46)$$

Nesta expressão, R_n e I_n são variáveis aleatórias gausseanas de média zero e variância σ_v^2 .

2.3 Interacção vento-estrutura

O estudo da interacção entre um corpo sólido e o fluxo de ar em torno dele é feito no âmbito da aerodinâmica, que corresponde a um ramo da Mecânica de Fluidos.

Quando um fluxo de ar de velocidade v atravessa uma estrutura geram-se, na superfície desta, tensões de corte, τ_w , devidas à viscosidade do ar, e tensões normais resultantes das pressões p que o ar exerce sobre a superfície da estrutura [50]. Cada elemento de área dA desta superfície fica sujeito às forças elementares $\tau_w dA$ e $p dA$ indicadas na Figura 2.9. À resultante destas

forças elementares correspondem as seguintes forças aerodinâmicas: força de arraste, F_D , que actua na direcção do escoamento, e força de sustentação, F_L , perpendicular a esta direcção. Do desvio do ponto de aplicação destas duas forças em relação ao centro de torsão da estrutura resulta um momento torsor, M_t [34].

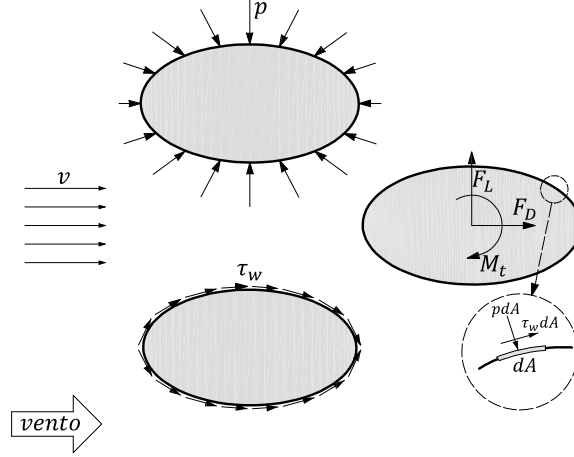


Figura 2.9: Momento torsor M_t e forças aerodinâmicas F_D e F_L devidas às tensões τ_w e pressões p .

Usualmente, as forças F_D e F_L e o momento torsor M_t são traduzidos por meio de parâmetros adimensionais (coeficientes aerodinâmicos de força e momento), designados, respectivamente, de coeficiente de arraste, c_D , coeficiente de sustentação, c_L , e coeficiente de momento torsor, c_{M_t} .

O coeficiente de arraste, c_D , que permite determinar a força sobre uma estrutura, associada à componente longitudinal do vento, é definido pelo quociente

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot A_{ref}}, \quad (2.47)$$

em que ρ é a densidade do ar, v_b , o valor de referência da velocidade do vento e A_{ref} , a área da superfície da estrutura sobre a qual o vento incide. O produto que figura em denominador da equação 2.47 traduz a pressão dinâmica do vento.

O valor do coeficiente c_D , assim como dos restantes coeficientes anteriormente mencionados, depende da forma da estrutura, da direcção do vento, das características locais do terreno e da influência de possíveis obstáculos existentes na proximidade da estrutura que possam gerar turbulência. Tendo em conta o número de variáveis envolvidas, a determinação dos coeficientes aerodinâmicos é usualmente realizada em túnel de vento, através de ensaios ao protótipo da estrutura. Nestes ensaios obtêm-se geralmente três valores para cada coeficiente

aerodinâmico, correspondentes às velocidades de referência, v_b , máxima ou de pico, média e mínima.

2.4 Determinação da acção do vento

2.4.1 Relação entre a velocidade e a força do vento

A força $F(t)$ exercida pelo vento, num dado instante t , num ponto da superfície de uma estrutura em que a velocidade do vento nesse instante é $v(t)$, é dada pela relação

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot [v(t)]^2 \quad (2.48)$$

Em §2.2 descreveu-se a velocidade instantânea do vento como a soma de uma componente média, $\bar{v}(z)$, e de uma flutuante $\tilde{v}(t)$. A força do vento, em função destas componentes, é expressa pela equação

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot [\bar{v}(z) + \tilde{v}(t)]^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot [\bar{v}(z)^2 + \tilde{v}(t)^2 + 2 \cdot \bar{v}(z) \cdot \tilde{v}(t)] \quad (2.49)$$

Para intensidades de turbulência baixas, verifica-se que a velocidade flutuante do vento é muito inferior à velocidade média deste, $\tilde{v}(t) \ll \bar{v}(z)$ [34]. Assim, pode considerar-se que $\tilde{v}(t)^2 \approx 0$ e, por conseguinte, que a força do vento é dada por

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot [\bar{v}(z)^2 + 2 \cdot \bar{v}(z) \cdot \tilde{v}(t)] \quad (2.50)$$

De acordo com a equação 2.49, para obter a força do vento variável no tempo, num ponto, é necessário conhecer as velocidades média, $\bar{v}(z)$, e flutuante, $\tilde{v}(t)$, do vento nesse ponto. A obtenção de $\bar{v}(z)$ pode ser feita a partir de uma das relações apresentadas em §2.2.1. A determinação de $\tilde{v}(t)$ pode ser efectuada recorrendo, por exemplo, a qualquer um dos métodos de simulação numérica apresentados §2.2.3.

Em alternativa à determinação da acção do vento sobre uma estrutura por forças variáveis no tempo, as principais normas e regulamentos do projecto de Engenharia Civil, como o Eurocódigo 1 e a norma americana ASCE/SEI 7-10, representam esta acção, de um modo simplificado, por um conjunto de pressões ou forças estáticas que traduzem, nessa estrutura, efeitos equivalentes aos efeitos extremos de um vento turbulento. Este modo de definição da acção do vento numa estrutura constitui a base do método GLF (iniciais de *Gust Loading Factor*).

Como na presente dissertação serão aplicadas as directrizes da norma ASCE/SEI 7-10 a uma *cobertura isolada de uma vertente*, estrutura equiparada ao seguidor solar em análise, no parágrafo seguinte é feita uma breve introdução ao método GLF para compreensão *a posteriori* das fórmulas apresentadas na norma referida para a determinação da acção do vento. As directrizes da norma ASCE/SEI 7-10 para a estrutura citada são apresentadas em §3.4.

2.4.2 Força estática do vento baseada no método GLF

O método GLF [51] foi inicialmente introduzido por Davenport em 1967. Este método sofreu, ao longo dos anos, algumas alterações devidas a autores como Vellozzi e Cohen, Vickery, Solari e Simiu e Scanlan. Estas diferentes variantes do método inicial foram integradas nos diversos regulamentos internacionais do projecto de Engenharia Civil, pelo que esses regulamentos apresentam algumas discrepâncias sobre o modo como é definida a força do vento.

O método tradicional GLF, tal como foi proposto por Davenport, define a força estática a uma altura z acima do solo, $\hat{F}(z)$, equivalente à força de pico do vento, pela relação

$$\hat{F}(z) = \bar{F}(z) \cdot G^Y \quad (2.51)$$

em que G^Y representa o factor de pico de resposta ou *factor DGLF* (iniciais de *Gust loading factor for displacement*), que contempla os efeitos da turbulência em ressonância com o modo de vibração da estrutura, e $\bar{F}(z)$ a força média do vento dada por

$$\bar{F}(z) = \bar{q}_T(z) \cdot c_D \cdot A_{ref}, \quad (2.52)$$

sendo a pressão média do vento $\bar{q}_T(z)$ traduzida pela expressão

$$\bar{q}_T(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}_T^2(z) \quad (2.53)$$

Nesta relação, $\bar{v}_T(z)$ é a velocidade média do vento medida durante o intervalo de tempo T .

Nas diferentes normas verificam-se algumas diferenças relativamente às expressões que são apresentadas para obter o factor G^Y . Uma das relações usadas para exprimir este factor é

$$G^Y = 1 + 2 \cdot g_v \cdot I_v(z) \cdot \sqrt{Q + R}, \quad (2.54)$$

2.4. Determinação da acção do vento

onde Q é o coeficiente de fundo da resposta, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da estrutura, e R , o coeficiente de resposta ressonante, que tem em consideração os efeitos de ressonância que podem ocorrer na estrutura sob a acção do vento.

O Eurocódigo 1 e a norma ASCE/SEI 7-10 propõem fórmulas distintas da de Davenport, as quais apresentam também entre si, algumas discrepâncias. Uma das principais diferenças reside na definição dos tempos de amostragem relativos à determinação da velocidade do vento.

As expressões que definem a força estática de pico do vento relativa a um período T , $\hat{F}_T(z)$, nas diferentes normas, podem ser traduzidas por uma única relação genérica, a seguir apresentada [52, 53].

$$\hat{F}_T(z) = F_\tau(z) \cdot G_\tau \quad (2.55)$$

Nesta relação, G_τ é o coeficiente estrutural e $F_\tau(z)$ a “força dinâmica do vento” relativa a um período τ . Os índices τ e T , que surgem associados a algumas das grandezas indicadas nas fórmulas que se apresentam, indicam os dois tempos diferentes de amostragem da velocidade do vento considerados nas diferentes normas.

O coeficiente estrutural G_τ é obtido pelo quociente entre o factor de pico de resposta, G_T^Y , e o *factor de rajada para a pressão dinâmica do vento* ou simplesmente *factor de rajada* G^F (iniciais de *Gust Factor*), $G_q^\tau(T)$, de acordo com a equação abaixo indicada.

$$G_\tau = \left(\frac{G_T^Y}{G_q^\tau(T)} \right) \quad (2.56)$$

O factor $G_q^\tau(T)$ é dado pela relação

$$G_q^\tau(T) = \frac{q_\tau(z)}{\bar{q}_T(z)} \quad (2.57)$$

sendo $q_\tau(z)$ a pressão dinâmica de pico e $\bar{q}_T(z)$ a pressão média do vento.

Segundo o Eurocódigo 1 e a norma ASCE/SEI 7-10, $G_q^\tau(T)$ relaciona-se com o factor de rajada $G_v^\tau(T)$, definido em §2.2.1, por meio da relação

$$G_q^\tau(T) = 2 \cdot G_v^\tau(T) - 1 \quad (2.58)$$

As normas ASCE/SEI 7-10 e o Eurocódigo 1 definem a força dinâmica $\hat{F}_\tau(z)$, respectivamente, pelas equações

$$\hat{F}_\tau(z) = q_\tau(z) \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot G_\tau = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\tau^2}_{q_\tau(z)} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot G_\tau \quad (2.59)$$

$$\hat{F}_\tau(z) = [\bar{q}_T(z) \cdot G_q^\tau(T)] \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot G_\tau = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}_T \cdot G_q^\tau(T)}_{q_\tau(z)} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot G_\tau \quad (2.60)$$

em que V_τ é a velocidade de rajada de τ segundos de duração. As duas relações supracitadas, embora escritas de formas diferentes, conduzem a valores de $\hat{F}_\tau(z)$ muito aproximados.

Capítulo 3

Acção do Vento em Seguidores Solares

3.1 Considerações gerais

A crescente procura de energia renovável fotovoltaica tem vindo a despoletar o interesse por estruturas metálicas do tipo seguidor solar, destinadas a suportar os painéis fotovoltaicos. Do ponto de vista estrutural, procura-se que este tipo de estruturas consigam resistir a um conjunto de acções, das quais o vento é a mais condicionante. Na fase de dimensionamento é portanto crucial a correcta análise da acção do vento sobre o seguidor solar. Esta análise deve ter em consideração vários factores, nomeadamente, a envolvente em que este está inserido (rugosidade do terreno), a sua posição relativamente à dos restantes seguidores da central fotovoltaica (na periferia ou no interior da central), e as suas características aerodinâmicas.

A falta de documentação regulamentar especializada para a definição da acção do vento em seguidores solares leva a que a maioria dos estudos decorram em túnel de vento. Todavia, quando os equipamentos necessários a este tipo de ensaios não são acessíveis, é necessário encontrar outras alternativas. Para determinar a pressão do vento sobre os seguidores solares, alguns dos engenheiros, responsáveis pela sua concepção, procuraram aplicar, ao estudo da acção do vento sobre este tipo de estruturas, os regulamentos e normas direccionados para o projecto de Engenharia Civil. No caso particular dos seguidores solares com a configuração dos da Figura 3.1(a) e (b) esses autores equiparam estes seguidores, do ponto de vista da acção do vento, a *coberturas isoladas de uma vertente*¹. Os coeficientes de pressão e força para estas estruturas, preconizados em normas e regulamentos de Engenharia Civil, são definidos para uma pressão dinâmica máxima ou de pico, correspondente à acção directa

¹Entende-se por cobertura isolada, a cobertura de uma estrutura que não possui paredes permanentes e que é suportada por elementos que, pelas suas reduzidas dimensões, não constituem um obstáculo significativo ao escoamento do ar.

do vento longitudinal turbulento sobre essas estruturas. Em termos dos seguidores solares numa central fotovoltaica, apenas os seguidores da periferia, primeira e segunda fileiras, estão sujeitos à acção directa do vento. Para estes, segundo alguns autores [15, 18], são válidas as disposições das normas e regulamentos do projecto de Engenharia Civil estabelecidos para *coberturas isoladas de uma vertente*, as quais conduzem as pressões de pico equiparáveis às obtidas em ensaios em túnel de vento. No entanto, o mesmo não é válido para os seguidores interiores, onde a acção do vento é atenuada pelo “efeito de abrigo” e afectada pela recirculação do ar a qual conduz a fenómenos aerodinâmicos que não são contabilizados nas normas.

Alguns autores, para dimensionar os seguidores solares com as configurações anteriormente referidas, nas posições θ compreendidas entre 0° e 90° , através de normas e regulamentos do projecto de Engenharia Civil, admitiram que, independentemente da sua inclinação relativamente à horizontal, eles comportam-se como um simples *painel de sinalização* ($\theta = 90^\circ$). Embora esta hipótese seja admitida por alguns engenheiros e tenham sido publicados na *internet* alguns relatórios técnicos relativos ao cálculo da acção do vento sobre o seguidor solar nas posições $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ equiparando-o a um *painel de sinalização*, esta simplificação não é a mais correcta e deve ser evitada. Efectivamente, os coeficientes de força c_f atribuídos ao *painel de sinalização* não traduzem os efeitos do vento numa estrutura idêntica inclinada de um ângulo θ diferente de 90° [15, 16].

3.2 Modelos de seguidores solares

No mercado de energia fotovoltaica existem vários modelos de seguidores Solares. Quanto à sua configuração, os seguidores solares podem ser classificados em quatro tipos: pedestal, *roll-tilt*, concentrador solar e plataforma giratória, que são ilustrados na Figura 3.1.



(a) Pedestal.



(b) Roll-tilt.



(c) Concentrador solar.



(d) Plataforma giratória.

Figura 3.1: Tipos de seguidores solares [54].

Os seguidores solares do tipo pedestal são formados por uma coluna metálica vertical que suporta uma malha metálica sobre a qual são fixados os painéis fotovoltaicos. Os seguidores do tipo *roll-tilt* são uma variante dos do tipo pedestal. A diferença entre eles reside no facto de cada um dos painéis fotovoltaicos dos seguidores *roll-tilt* estarem ligados a dispositivos mecânicos que permitem a sua rotação individual. Em alternativa aos seguidores do tipo pedestal e *roll-tilt*, em algumas centrais, são adoptados concentradores solares. Este tipo de seguidores, em relação aos dois anteriormente referidos, são de menor altura e a superfície de exposição ao sol tem maior comprimento. São usualmente constituídos por estruturas metálicas treliçadas, fundadas no solo, que suportam a superfície dos painéis. Um outro tipo de seguidor distinto dos restantes é o de plataforma giratória. Este tipo de seguidor, com uma superfície parabólica, é um sistema de aproveitamento de energia solar em grande escala, sendo, no entanto, uma solução mais dispendiosa.

De forma a maximizar a incidência de radiação solar sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos, é conveniente que os seguidores solares tenham capacidade de rodar de forma a acompanhar, ao longo do dia, o movimento do sol. Conforme a sua capacidade de rotação, os seguidores solares são classificados em sistemas uniaxiais, se podem rodar apenas em torno de um único eixo, isto é, de um ângulo θ em torno do eixo y ou ψ em torno do eixo z , e sistemas biaxiais, se podem rodar em torno de cada um dos dois referidos eixos (Figura 3.2). O ângulo ψ é definido em relação à direcção do vento.

O seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja, em estudo, é do tipo pedestal e uniaxial. Este pode rodar de um ângulo ψ até 240° , tendo, no entanto, uma inclinação constante $\theta = 45^\circ$ em relação à horizontal.

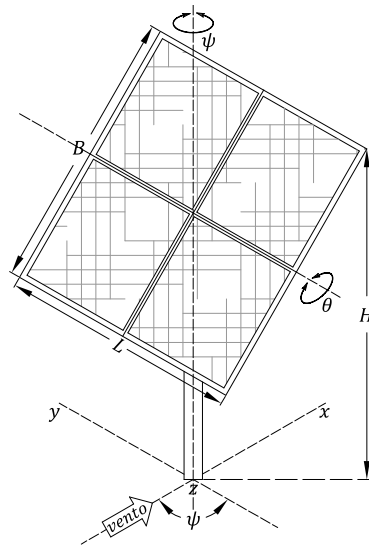


Figura 3.2: Rotações θ e ψ dos seguidores solares.

3.3 Redução da acção do vento em centrais fotovoltaicas

A livre circulação do vento dentro de uma central fotovoltaica é constrangida pela presença dos próprios seguidores solares. Por conseguinte, os movimentos de ar numa central são difíceis de prever, o que leva a que a maioria dos estudos que visam compreendê-los sejam efectuados em túnel de vento. Nestes ensaios práticos são usualmente analisados os seguintes seguidores: os que estão dispostos na periferia da central fotovoltaica, que recebem a acção directa do vento, e os que estão localizados no seu interior, sujeitos ao vento alterado devido à presença dos restantes seguidores. Relativamente a estes últimos, os referidos ensaios mostram que a pressão neles exercida é inferior à que se observa nos seguidores periféricos, isto é, localizados nas primeiras e segundas “fileiras”. As várias “fileiras” de seguidores solares nas centrais providenciam uma redução da acção do vento nos seguidores mais interiores, uma vez que conferem a estes alguma “protecção” ao atenuarem os efeitos das rajadas de vento. Estudos efectuados mostram que, da periferia para o interior da central, a redução da velocidade média do vento, à mesma altura z , pode atingir cerca de 30% [11, 12, 13]. A Figura 3.3 ilustra esquematicamente a redução da velocidade média do vento num seguidor solar interior relativamente à dos seguidores periféricos. Alguns estudos mostraram ainda a existência de uma diminuição da amplitude das flutuações da velocidade em torno do valor médio desta. No entanto, esta conclusão não pode ser generalizada a todos os casos, pois carece ainda de um maior número de estudos.

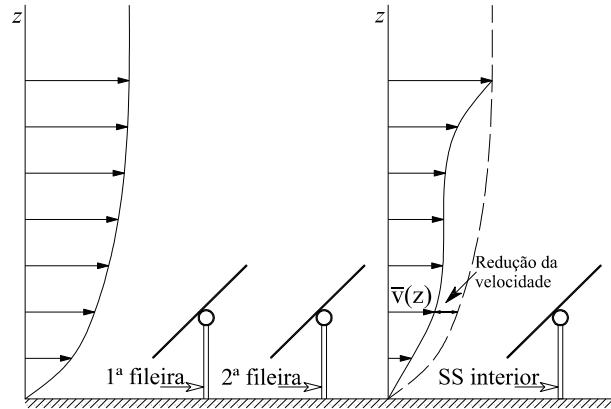


Figura 3.3: Redução da velocidade média do vento da periferia para o interior de uma Central.

A redução da acção do vento da periferia para o interior de uma central é condicionada, entre outros factores, pela densidade e disposição dos seguidores. Em relação a este último factor mostra-se que há maior eficácia na referida redução quando os seguidores estão dispostos em “fileiras” paralelas umas às outras [55]. Quanto à densidade de seguidores (razão entre a área por eles ocupada e a área total da central) se, por um lado, o crescimento desta grandeza leva a maior redução da velocidade média do vento, por outro, se a área de ocupação dos seguidores corresponder a mais de 70% da área total da central observa-se um aumento significativo da turbulência do vento no interior desta [55]. É assim importante investigar acerca do valor da distância mínima que deve existir entre as “fileiras” de seguidores numa central. De forma a diminuir a velocidade do vento no interior desta, podem ser colocados muros ou vedações interiores com uma configuração semelhante à que se apresenta na Figura 3.4. A altura destes elementos é condicionada pela altura H dos seguidores solares [11, 55].

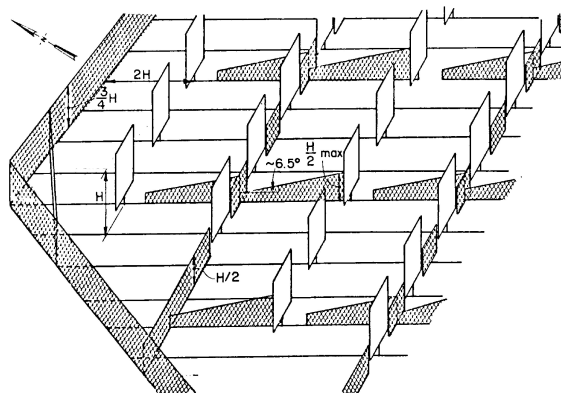


Figura 3.4: Disposição das vedações no interior de centrais fotovoltaicas [11].

Para reduzir a acção do vento que incide sobre os seguidores solares periféricos, é usual delimitar o perímetro da central por um muro ou por uma vedação cuja área de aberturas não seja superior a 50% da sua área total. A existência destes obstáculos, em torno do perímetro da central, diminui a velocidade média do vento que incide sobre as duas primeiras “fileiras” de seguidores periféricos, tal como mostra a Figura 3.5. Eles não interferem, no entanto, no perfil da velocidade média no interior da central [11]. Segundo vários autores, a presença de muros na periferia de uma central pode reduzir consideravelmente a velocidade do vento ao nível dos seguidores periféricos, aproximando-a da que é observada junto dos seguidores interiores. Todavia, os muros ao “elevarem” o fluxo de ar que sobre eles incide podem conduzir à formação de vórtices na região compreendida entre eles e a primeira “fileira” de seguidores. Alguns estudos mostram que para atenuar este tipo de fenómenos, em alternativa aos muros, devem ser adoptadas vedações com uma área de aberturas não superior a 50% da sua área total, pois que estas tendem a “quebrar” os vórtices, diminuindo assim a turbulência. A altura destas vedações deve ser superior a metade da altura do seguidor ($H/2$), mas não muito superior a H , já que para alturas de vedações acima de H não existem melhorias acrescidas de protecção [55].

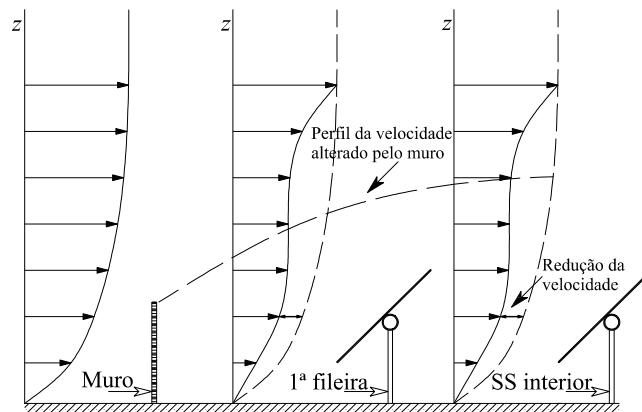


Figura 3.5: Redução da velocidade média do vento nos seguidores periféricos, na presença de um muro em redor da Central.

A redução da acção do vento em cada seguidor solar, além dos factores antes mencionados, concretamente, a densidade e disposição dos seguidores e a existência de muros ou vedações, depende ainda da direcção do vento e dos ângulos θ e ψ , assinalados na Figura 3.2, que definem a posição do seguidor solar. O grau de protecção que um dado seguidor goza relativamente ao vento, devido à presença dos restantes seguidores e dos muros e vedações existentes numa

3.3. Redução da acção do vento em centrais fotovoltaicas

central, designado de “efeito de abrigo”, pode ser quantificado por meio do parâmetro A_a , abaixo definido, conhecido por “área de abrigo” [13].

$$A_a = \frac{A_B}{A_F}, \quad (3.1)$$

sendo $A_B = A_o + A_{m/v}$.

A_B é a área projectada dos seguidores solares, num plano normal à direcção do vento; $A_{m/v}$ é a área dos muros/vedações interiores e exteriores e A_F a área total projectada no solo de todos os obstáculos incluídos no cálculo de A_B . As áreas A_B e A_F na relação 3.1 estão definidas na Figura 3.6.

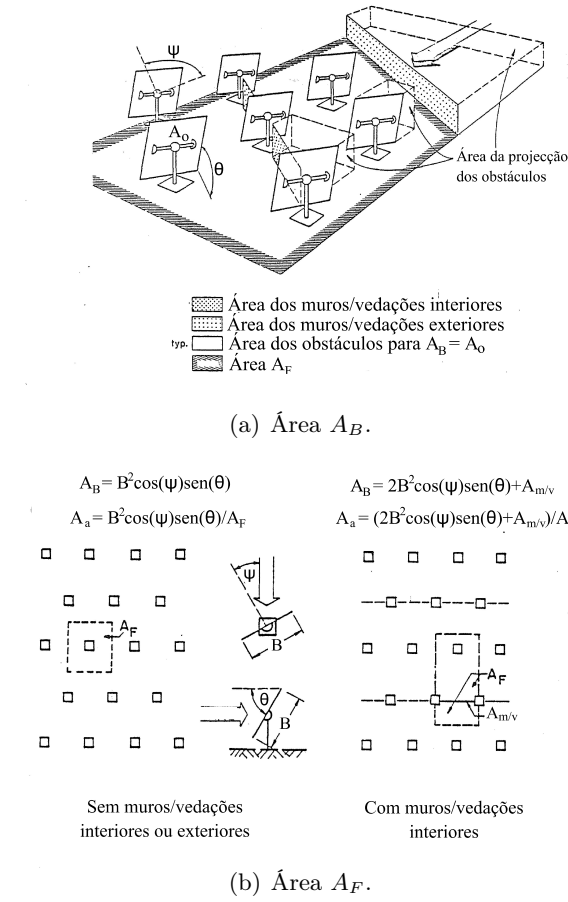


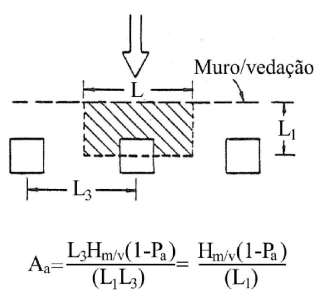
Figura 3.6: Definição de A_B e A_F para o cálculo da “área de abrigo”, A_a [13].

Dos estudos realizados em túnel de vento comprova-se que as pressões média e de pico sobre os seguidores solares diminuem significativamente com o aumento de A_a [13].

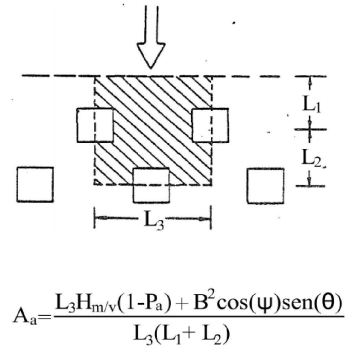
No caso de não existirem muros ou vedações que delimitem o perímetro da central, o conceito de “área de abrigo”, A_a , não é aplicável aos seguidores da periferia, ou seja, aos dispostos nas

primeira e segunda “fileiras”. Para estes dois casos arbitra-se um valor de A_a igual a 0,01 e 0,02, respectivamente.

Se na periferia existirem muros ou vedações, com uma percentagem de aberturas P_a , de altura $H_{m/v}$, colocados a uma distância L_1 da primeira “fileira” de seguidores solares e a uma distância $L_1 + L_2$ da segunda fileira, as “áreas de abrigo”, A_a , relativas à primeira e segunda “fileiras” de seguidores são dadas pelas relações que se apresentam na Figura 3.7. Nesta Figura, L_3 é a distância entre dois seguidores solares consecutivos de uma mesma “fileira” e P_a a razão entre a área de aberturas das vedações ou muros e a sua área total.



(a) Primeira fileira.



(b) Segunda fileira.

Figura 3.7: Definição das áreas de abrigo, A_a , para seguidores dispostos na primeira e segunda “fileiras” [13].

Além das medidas já referidas que podem ser implementadas para reduzir a acção do vento nos seguidores solares deve ainda acrescentar-se as que tendem a diminuir o efeito indesejável resultante da perturbação do escoamento do ar junto dos vértices do seguidor. Efectivamente, o escoamento de ar, na presença de um seguidor solar, divide-se junto aos vértices rectos deste, com formação de vórtices, como se ilustra na Figura 3.8.

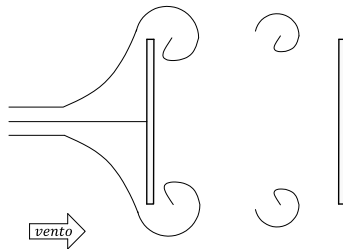


Figura 3.8: Escoamento do ar nos vértices rectos do seguidor solar.

Com o intuito de diminuir os efeitos da referida turbulência pode integrar-se nos seguidores

3.3. Redução da acção do vento em centrais fotovoltaicas

solares, como se mostra na Figura 3.9, um dos seguintes sistemas: guardas superiores ou inferiores, muros ou vedações envolventes da parte inferior do seguidor solar e dispositivos de carenagem nos vértices [11]. Estes últimos dispositivos fazem com que o fenómeno de recirculação do ar se afaste mais dos vértices rectos do seguidor.

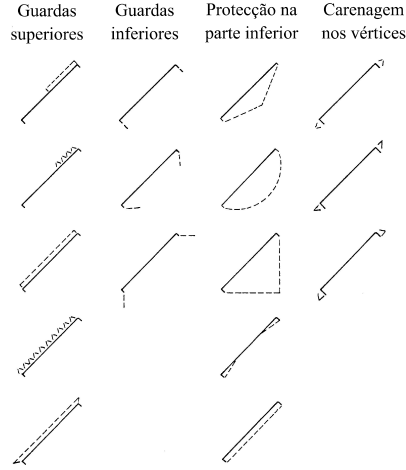


Figura 3.9: Mecanismos de redução dos efeitos da turbulência [11].

Do exposto neste capítulo conclui-se que ao realizar os testes de um seguidor em túnel de vento, com vista à determinação da acção do vento neste tipo de estruturas, é necessário ter em consideração a presença dos restantes seguidores e demais obstáculos que numa central condicionam a acção do vento.

No parágrafo seguinte são descritos os coeficientes aerodinâmicos intervenientes na análise do seguidor solar sob a acção do vento.

3.3.1 Valores de coeficientes de pressão e força para *coberturas isoladas de uma vertente*

O estudo da acção do vento sobre o seguidor solar em estudo foi efectuado equiparando esta estrutura a uma *cobertura isolada de uma vertente* inclinada de um ângulo θ igual a 45° em relação à horizontal. Neste tipo de cobertura, apresentada esquematicamente na Figura 3.10, o vento pode actuar simultaneamente nas suas superfícies superior e inferior. O coeficiente de pressão resultante, c_p , num ponto da superfície da cobertura, é

$$c_p = \frac{p_s - p_i}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2}, \quad (3.2)$$

em que p_s e p_i são as pressões exercidas, respectivamente, nas superfícies superior e inferior da cobertura (Figura 3.10), nesse ponto, e v_b o valor de referência da velocidade do vento. É usual arbitrar a pressão como positiva se, relativamente à superfície da cobertura, ela actuar no sentido descendente e, como negativa, se actuar no sentido ascendente.

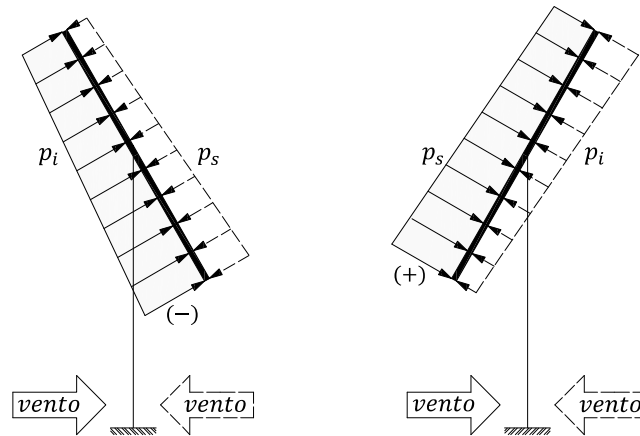


Figura 3.10: Pressão do vento nas superfícies superior, p_s , e inferior, p_i , de uma *cobertura isolada de uma vertente*.

Para obter o coeficiente de pressão c_p para uma cobertura isolada de uma vertente em que $\theta = 45^\circ$, procurou-se, como ponto de partida, aplicar a norma vigente em Portugal, o Eurocódigo 1. De acordo com este, só é possível determinar a acção do vento sobre coberturas inclinadas de uma vertente para os valores de θ no domínio $[0^\circ, 30^\circ]$, indicados na Tabela 3.1. Os respectivos valores de c_p e c_f são em função do grau de obstrução da cobertura φ . Os valores $\varphi = 0$ e $\varphi = 1$ referem-se, respectivamente, a uma cobertura isolada vazia e a uma cobertura totalmente obstruída por objectos que impeçam o livre escoamento do vento sob esta. Na Tabela 3.1 os valores de c_f indicados são os coeficientes de força global, que traduzem a força resultante na cobertura.

Tabela 3.1: Valores de c_p e de c_f para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com EC1 [27].

θ	Obstrução φ	Coeficientes c_f	Coeficientes c_p		
			Zona a	Zona b	Zona c
0°	Máximo, qualquer φ	0,2	0,5	1,8	1,1
	Mínimo, $\varphi = 0$	-0,5	-0,6	-1,3	-1,4
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,3	-1,5	-1,8	-2,2
5°	Máximo, qualquer φ	0,4	0,8	2,1	1,3

3.3. Redução da acção do vento em centrais fotovoltaicas

	Mínimo, $\varphi = 0$	-0,7	-1,1	-1,7	1,8
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,2	-2,5
	Máximo, qualquer φ	0,5	1,2	2,4	1,6
10°	Mínimo, $\varphi = 0$	-0,9	-1,5	-2,0	-2,1
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,6	-2,7
	Máximo, qualquer φ	0,7	1,4	2,7	1,8
15°	Mínimo, $\varphi = 0$	-1,1	-1,8	-2,4	-2,5
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
	Máximo, qualquer φ	0,8	1,7	2,9	2,1
20°	Mínimo, $\varphi = 0$	-1,3	-2,2	-2,8	-2,9
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
	Máximo, qualquer φ	1,0	2,0	3,1	2,3
25°	Mínimo, $\varphi = 0$	-1,6	-2,6	-3,2	-3,2
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,5	-2,5	-2,8
	Máximo, qualquer φ	1,2	2,2	3,2	2,4
30°	Mínimo, $\varphi = 0$	-1,8	-3,0	-3,8	-3,6
	Mínimo, $\varphi = 1$	-1,4	-1,5	-2,2	-2,7
	Máximo, qualquer φ	1,2	2,2	3,2	2,4

Segundo EC1 os coeficientes c_p tomam valores diferenciados sobre a superfície da cobertura de área $A_{ref} = B \cdot L$, nas zonas a, b e c indicadas na Figura 3.11(a). Em relação aos coeficientes de força global, c_f , para cada ângulo de inclinação θ devem ser analisados os quatro casos indicados na Figura 3.11(b).

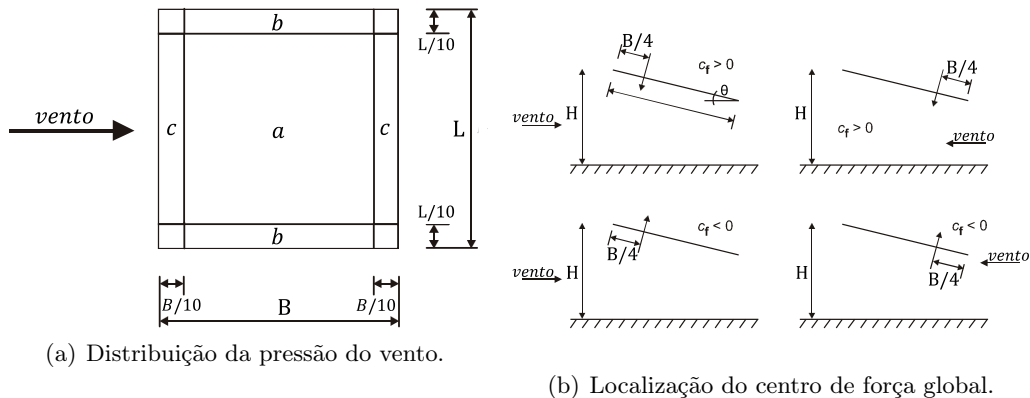


Figura 3.11: Distribuição da pressão do vento e localização do centro de força global do vento segundo EC1 [27].

Capítulo 3. Acção do Vento em Seguidores Solares

Procurando ainda aplicar os documentos vigentes em Portugal, ao caso da cobertura em causa, recorreu-se ao Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA). Todavia, este regulamento também não contempla valores de coeficientes de pressão c_p para coberturas de uma vertente inclinadas $\theta = 45^\circ$. Assim, foram analisadas outras normas e regulamentos internacionais, tendo verificado que, entre eles, apenas a norma americana ASCE/SEI 7-10 e os documentos normativos espanhol NBE-AE/88 e russo GOST 27751-88 incluem os valores de c_p para as condições pretendidas.

A norma americana ASCE/SEI 7-10 estabelece as regras de cálculo da acção do vento sobre edifícios e outros tipos de estruturas, entre os quais as coberturas isoladas de uma vertente, designadas de *monoslope free roofs*. Para o caso destas coberturas, a norma ASCE abrange coeficientes de pressão resultante para ângulos de inclinação θ até 45° . Os valores destes coeficientes estabelecidos por esta norma, para os sentidos I e II do vento, são os indicados na Tabela 3.2.

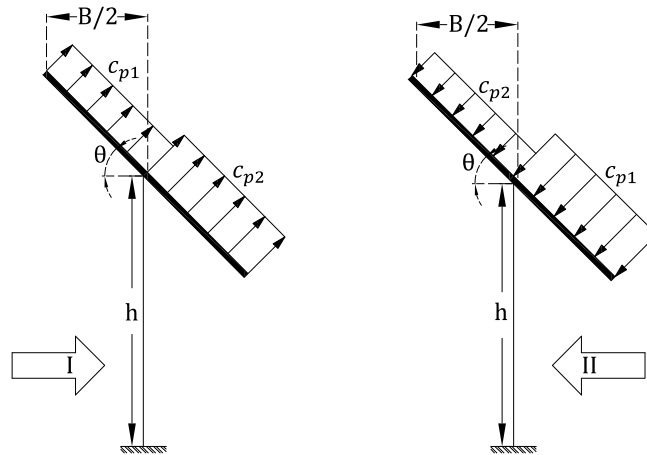


Figura 3.12: Distribuição da pressão para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10, para os sentidos I e II do vento.

Tabela 3.2: Coeficientes de pressão resultante para coberturas isoladas de uma vertente de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10 [28].

		Sentido I				Sentido II			
		$\varphi = 0$		$\varphi = 1$		$\varphi = 0$		$\varphi = 1$	
θ	Caso	c_{p1}	c_{p2}	c_{p1}	c_{p2}	c_{p1}	c_{p2}	c_{p1}	c_{cp2}
0°	A	1,2	0,3	-0,5	-1,2	1,2	0,3	-0,5	-1,2
	B	-1,1	-0,1	-1,1	-0,6	-1,1	-0,1	-1,1	-0,6

3.4. Acção do vento em *coberturas isoladas de uma vertente* segundo a norma ASCE/SEI 7-10

7,5°	A	-0,6	-1,0	-1,0	-1,5	0,9	1,5	-0,2	-1,2
	B	-1,4	0,0	-1,7	-0,8	1,6	0,3	0,8	-0,3
15°	A	-0,9	-1,3	-1,1	-1,5	1,3	1,6	0,4	-1,1
	B	-1,9	0,0	-2,1	-0,6	1,8	0,6	1,2	-0,3
22,5°	A	-1,5	-1,6	-1,5	-1,7	1,7	1,8	0,5	-1,0
	B	-2,4	-0,3	-2,3	-0,9	2,2	0,7	1,3	0,0
30°	A	-1,8	-1,8	-1,5	-1,8	2,1	2,1	0,6	-1,0
	B	-2,5	-0,5	-2,3	-1,1	2,6	1,0	1,6	-0,1
37,5°	A	-1,8	-1,8	-1,5	-1,8	2,1	2,2	0,7	-0,9
	B	-2,4	-0,6	-2,2	-1,1	2,7	1,1	1,9	0,3
45°	A	-1,6	-1,8	-1,3	-1,8	2,2	2,5	0,8	-0,9
	B	-2,3	-0,7	-1,9	-1,2	2,6	1,4	2,1	0,4

Analisando as normas EC1 e ASCE/SEI 7-10 verifica-se que elas propõem uma distribuição de pressão diferente sobre a *cobertura isolada*. O mesmo acontece relativamente a outras normas internacionais. Blessman [56], um dos responsáveis pelo desenvolvimento da aerodinâmica das construções nos últimos cinquenta anos, referiu que “para nenhuma outra forma construtiva os resultados encontrados na literatura, principalmente nas normas de acção do vento, apresentam valores tão díspares. Em certos casos, para uma mesma cobertura, ora é indicada uma força em um sentido, ora em sentido oposto, ora em ambos os sentidos”.

Dada a aceitação da norma americana ASCE/SEI 7-10 no projecto de estruturas e o facto dela contemplar valores de c_p para coberturas isoladas de uma vertente a 45°, optou-se por seguir esta norma. É de notar ainda que a ASCE, relativamente à acção do vento, assenta nos mesmos pressupostos teóricos que o Eurocódigo 1, isto é, ambas fazem uso do método GLF. No parágrafo seguinte serão apresentados os princípios de determinação da acção do vento segundo a norma ASCE/SEI 7-10.

3.4 Acção do vento em *coberturas isoladas de uma vertente* segundo a norma ASCE/SEI 7-10

Neste parágrafo apresentam-se os princípios gerais de determinação da pressão exercida pelo vento em *coberturas isoladas de uma vertente* contidos na norma americana ASCE/SEI 7-10.

Esta norma estabelece os princípios de determinação da acção do vento sobre estruturas de Engenharia Civil, entrando em consideração com a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da estrutura.

A seguir apresenta-se a tradução, feita pela autora da presente dissertação, do extracto da norma ASCE/SEI 7-10 considerado de interesse para a determinação da pressão exercida pelo vento em *coberturas isoladas de uma vertente*. A nomenclatura atribuída a alguma das grandezas não corresponde à que figura na presente norma, mas sim à que tem vindo a ser adoptada para as mesmas ao longo da dissertação.

3.4.1 Pressão exercida pelo vento em *coberturas isoladas de uma vertente*

A pressão do vento, p , sobre coberturas isoladas de uma vertente², é determinada pela equação 3.3, em função da pressão dinâmica, $q(z)$, à altura média da cobertura $z = h$, do coeficiente estrutural, G , e dos coeficientes de pressão resultante (*net pressure coefficient*), c_p . A altura média da cobertura, h , é definida como sendo a média das alturas máxima e mínima da cobertura.

$$p = q(z) \cdot G \cdot c_p \quad (3.3)$$

3.4.1.1 Pressão dinâmica do vento

A pressão dinâmica do vento, $q(z)$, avaliada à altura média da cobertura, $z = h$, é dada pela equação 3.4. Esta grandeza é determinada a partir dos coeficientes de rugosidade (*velocity pressure exposure coefficient*), $c_r(z)$, de orografia (*topographic factor*), c_o , de direcção (*wind directionality factor*), c_{dir} , e da velocidade de referência do vento (*basic wind speed*), V .

$$q(z) = 0,613 \cdot c_r(z) \cdot c_{dir} \cdot c_o \cdot V^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.4)$$

Nesta expressão, o valor 0,613 traduz o resultado do produto $\frac{1}{2} \cdot \rho$, sendo ρ a densidade do ar. O valor de ρ depende da altitude, temperatura do ar e da pressão barométrica. Segundo a norma ASCE $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; este valor está associado a uma temperatura do ar de 15°C e uma pressão barométrica à altura do nível do mar de 101,325 kPa [28].

A norma ASCE permite que seja arbitrado um outro valor de ρ nas situações em que tal o justifique. No contexto do presente trabalho, os fundamentos da referida norma serão

²As coberturas isoladas de uma vertente são designadas na norma ASCE/SEI 7-10 de *monoslope free roofs*. Os princípios de determinação da pressão p sobre este tipo de estrutura são apresentados no capítulo 27 da referida norma. Nesta, o coeficiente estrutura, G , tem a designação de *gust-effect factor*.

3.4. Acção do vento em coberturas isoladas de uma vertente segundo a norma ASCE/SEI 7-10

aplicados a uma estrutura implementada em Portugal continental. Assim, considerou-se para ρ o valor $1,25 \text{ kg/m}^3$ que é estabelecido pelo *Anexo Nacional* do EC1 e adoptado a nível nacional [27]. Tendo em consideração este valor de ρ , o valor da pressão dinâmica $q(z)$ foi calculado no presente trabalho a partir da expressão

$$q(z) = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot c_r(z) \cdot c_{dir} \cdot c_o \cdot V^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.5)$$

Coefficiente de rugosidade, $c_r(z)$. O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, tem em consideração a variação da velocidade do vento em função da altura z e da rugosidade do terreno na direcção do vento considerada. Para coberturas isoladas, $c_r(z)$ é definido à altura média da cobertura, $z = h$, pelas relações 3.6 e 3.7 em função da altura da camada limite atmosférica (altura gradiente), z_g , e do parâmetro α .

$$c_r(z) = 2,01 \cdot \left(\frac{4,6}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{para } z < 4,6 \text{ m} \quad (3.6)$$

$$c_r(z) = 2,01 \cdot \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{para } 4,6 \leq z \leq z_g \text{ m} \quad (3.7)$$

Os parâmetros α e z_g dependem da categoria do terreno. A norma ASCE admite três categorias de terreno, designadas por B, C e D que seguidamente se apresentam. A cada uma destas, a ASCE atribui os parâmetros de terreno indicados na Tabela 3.3.

- **Categoria B.** Áreas urbanas e suburbanas, zonas arborizadas ou outro tipo de terreno com numerosos obstáculos pouco espaçados.
- **Categoria C.** Terreno do tipo campo aberto com vegetação rasteira e com obstáculos isolados de alturas inferiores a nove metro.
- **Categoria D.** Zonas planas, livres de obstáculos ou com superfícies de água (planícies e lagos). Esta categoria inclui terrenos lamacentos, salinas e superfícies de gelo.

Tabela 3.3: Parâmetros para cada categoria de terreno.

Categoria	α	z_g [m]	$\hat{\alpha}$	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ [m]	\bar{e}	z_{min} [m]
B	7,0	365,76	1/7,0	0,84	1/4,0	0,45	0,30	97,54	1/3,0	9,14
C	9,5	274,32	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152,40	1/5,0	4,57
D	11,5	213,36	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198,12	1/8,0	2,13

Coefficiente de orografia, c_o . Nas situações em que a velocidade do vento não é alterada pela topografia do terreno é legítimo arbitrar $c_o = 1$. Em terrenos com alterações abruptas de topografia (colinas, falésias, cristas, escarpas) deve ser atribuído um outro valor de c_o .³

Coefficiente de direcção, c_{dir} . O coeficiente de direcção, c_{dir} , traduz a probabilidade reduzida de o valor máximo da velocidade ocorrer na direcção considerada. Os valores de c_{dir} encontram-se tabelados na ASCE/SEI 7-10 para os diferentes tipos de estrutura (vd. tabela 26.6-1 da ASCE).

No caso particular de edifícios e coberturas, $c_{dir} = 0,85$.

Velocidade de rajada, V . No contexto da norma ASCE, a velocidade de referência do vento, v_b , corresponde à velocidade de uma rajada de vento, V , de 3 s de duração, medida a 10 m acima de um terreno de categoria C, cuja probabilidade de ocorrência em 50 anos é de 0,07. Na norma ASCE, as velocidades V nas diferentes regiões dos Estados Unidos da América abrangidas pela norma são definidas em mapas de isopletras da velocidade do vento.

Quando é necessário usar a ASCE numa região não preconizada por esta norma, como no caso do presente trabalho, deve ser considerado o valor de referência da velocidade do vento proposto na norma ou regulamento aplicável na região em causa. Contudo, se esse valor de referência da velocidade do vento não corresponder à velocidade de rajada de 3 s medida a 10 m de altura, ter-se-á que a partir dele calcular a referida velocidade de rajada V , por meio do factor de rajada $G_v^T(T)$ [28]. A seguir apresenta-se o método apresentado no anexo da norma ASCE para determinar o factor de rajada $G_v^T(T)$.

3.4.1.2 Factor de rajada

O método de determinação do factor de rajada, $G_v^T(T)$, apresentado na norma ASCE/SEI 7-10 foi proposto por Durst (1960) e teve por base uma análise estatística dos registos meteorológicos da velocidade do vento [27]. Este autor, a partir de várias medições da velocidade do vento, efectuadas a dez metros de altura acima de terrenos do tipo campo aberto, estabeleceu a relação, a essa altura, entre a velocidade média horária do vento (velocidade média medida em 3600 s), \bar{v}_{3600} , e a velocidade média máxima do vento, \bar{v}_t , medida num intervalo de t segundos. Os resultados de Durst foram incorporados na norma ASCE/SEI 7-10 na forma do gráfico apresentado na Figura 3.13 [28].

³Nestas situações c_o deve ser calculado através dos fundamentos apresentados em 26.8.2 da ASCE/SEI 7-10.

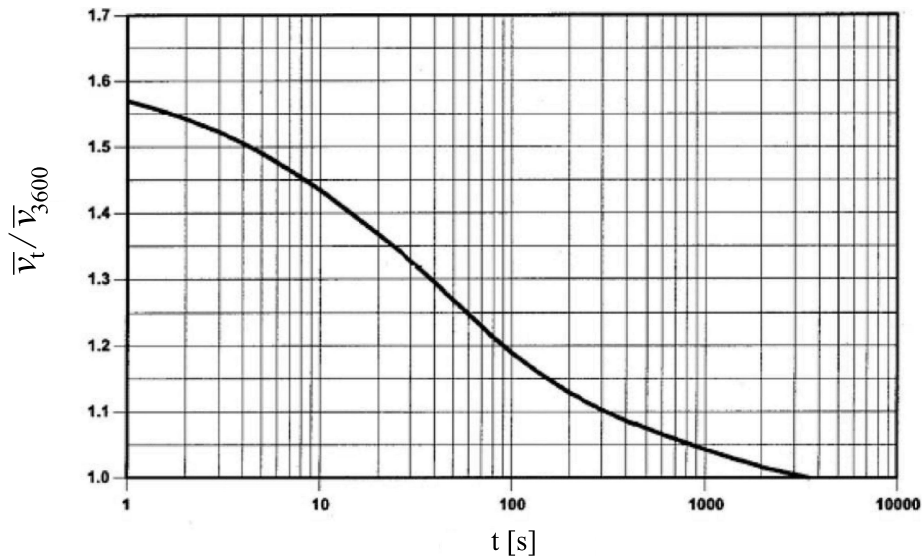


Figura 3.13: Variação de $\bar{v}_t / \bar{v}_{3600}$ com o tempo t [28].

3.4.2 Coeficiente estrutural

De acordo com a norma ASCE, a determinação do coeficiente estrutural, G , é condicionada pelo conceito de estrutura *rígida* e de estrutura *flexível*. Para averiguar se uma estrutura é rígida ou flexível deve ser avaliada a sua frequência própria fundamental, f_n . Em termos gerais, segundo a norma ASCE, uma estrutura é considerada flexível se $f_n < 1$ Hz e rígida se $f_n \geq 1$ Hz. A determinação do coeficiente estrutural, G , para estruturas rígidas é apresentada no parágrafo seguinte.

3.4.2.1 Coeficiente estrutural para estruturas *rígidas*

De acordo com a norma ASCE, para estruturas rígidas pode atribuir-se o valor 0,85 ao coeficiente estrutural G ou, em alternativa, calcular-se o valor deste coeficiente através da expressão

$$G = 0,925 \cdot \left[\frac{1 + 1,7 \cdot g_Q \cdot I_v(z_s) \cdot Q}{1 + 1,7 \cdot g_v \cdot I_v(z_s)} \right] \text{ com } g_Q = g_v = 3,4 \quad (3.8)$$

em que $I_v(z_s)$ é a intensidade de turbulência à altura $z_s = \max\{0,6 \cdot h; z_{min}\}$ e Q o coeficiente de fundo da resposta. Seguidamente serão apresentadas as relações que permitem calcular estas duas grandezas.

Intensidade de turbulência, $I_v(z_s)$. A intensidade de turbulência à altura de referência da cobertura isolada z_s , $I_v(z_s)$, é dada pela equação 3.9, em função dos parâmetros do terreno c e z_{min} , cujos valores constam na Tabela 3.3.

$$I_v(z_s) = c \cdot \left(\frac{10}{z_s} \right)^{1/6} \quad (3.9)$$

Coeficiente de fundo da resposta, Q . O coeficiente de fundo da resposta, Q , que traduz a falta de total correlação das pressões na superfície da estrutura, é dado por

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \cdot \left(\frac{L+h}{L(z)} \right)^{0,63}}} \quad (3.10)$$

em que h é a altura média da cobertura, L o comprimento horizontal da cobertura, medido na direcção perpendicular à direcção do vento, e $L_v(z)$ a escala de turbulência.

A escala de turbulência, $L_v(z)$, é dada pela equação

$$L_v(z) = \ell \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (3.11)$$

sendo os parâmetros ℓ e $\bar{\epsilon}$ obtidos na Tabela 3.3 em função da categoria de terreno.

3.4.3 Função de densidade espectral de potência adimensional

De acordo com a norma ASCE, a função de densidade espectral de potência adimensional, $S_L(z, f)$, é obtida em função da frequência adimensional, $f_L(z, f)$, a partir da relação

$$S_L(z, f) = \frac{7,47 \cdot f_L(z, f)}{[1 + 10,3 \cdot f_L(z, f)]^{5/3}} \quad (3.12)$$

A frequência adimensional é definida pela equação

$$f_L(z, f) = \frac{f \cdot L_v(z)}{\bar{v}(z)} \quad (3.13)$$

em que $L(z)$ é a escala de turbulência e $\bar{v}(z)$ a velocidade média horária do vento à altura z , obtida a partir da equação 3.14. Os valores dos parâmetros \bar{b} e $\bar{\alpha}$ são dados na Tabela 3.3 para cada categoria do terreno.

$$\bar{v}(z) = \bar{b} \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{\bar{\alpha}} \cdot V \quad (3.14)$$

3.4. Acção do vento em *coberturas isoladas de uma vertente* segundo a norma ASCE/SEI 7-10

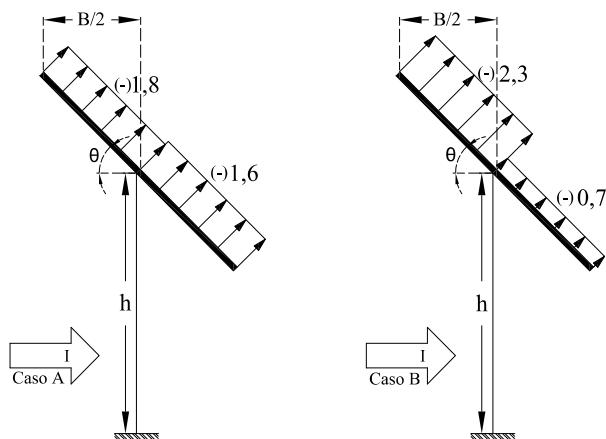
3.4.4 Coeficientes de pressão

A norma ASCE/SEI 7-10, como já referido em §3.3.1, estipula que para *coberturas isoladas de uma vertente* devem ser analisadas as seguintes quatro situações: vento a actuar nos sentidos I e II, a que correspondem duas distribuições de pressão diferente para cada um deles, representadas na Figura 3.14.

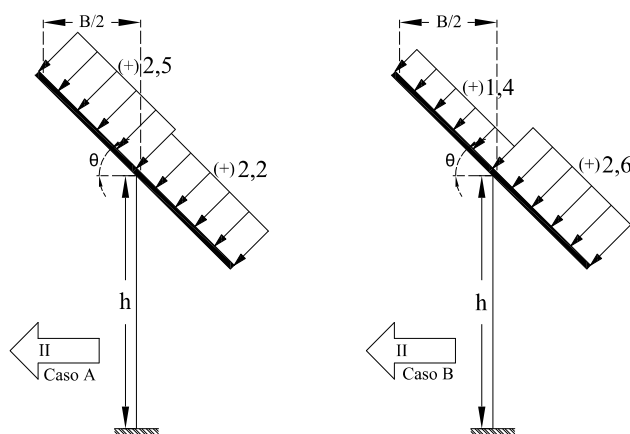
Na Tabela 3.4 são apresentados os coeficientes de pressão c_{p1} e c_{p2} para o caso particular de uma cobertura isolada de uma vertente com um ângulo de inclinação $\theta = 45^\circ$ e um grau de obstrução sob a cobertura, de valor nulo ($\varphi = 0$). Nesta tabela, os valores positivos (+) e negativos (-) dos referidos coeficientes correspondem, respectivamente, a acções resultantes do vento com sentido descendente e ascendente em relação à cobertura.

Tabela 3.4: Coeficientes de pressão c_{p1} e c_{p2} para $\theta = 45^\circ$.

		Direcção I		Direcção II	
θ	Caso	c_{p1}	c_{p2}	c_{p1}	c_{p2}
45°	A	-1,6	-1,8	2,2	2,5
	B	-2,3	-0,7	2,6	1,4



(a) Sentido I do vento.



(b) Sentido II do vento.

Figura 3.14: Distribuição das pressões do vento sobre uma *cobertura isolada de uma vertente* de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10.

Capítulo 4

Análise e Modelação do Seguidor Solar

Neste capítulo é feita a descrição, do ponto de vista estrutural, do tipo de seguidor solar instalado na Central Fotovoltaica da Amareleja. É apresentado o modelo estrutural de análise do seguidor solar e os pressupostos inerentes à sua concepção, assim como a determinação da acção do vento sobre o tipo de seguidor em causa.

A informação técnica relativa à estrutura do seguidor solar, apresentada nesta tese, foi maioritariamente facultada pela empresa *Amper Central Solar, SA*, tendo a restante sido conseguida através de várias inspecções *in loco* aos seguidores, realizadas pela autora da presente dissertação. A informação disponibilizada pela empresa sobre o seguidor solar refere-se somente à sua estrutura metálica. Sobre as características mecânicas dos painéis fotovoltaicos e a concepção das fundações da estrutura não foram facultadas quaisquer informações específicas.

4.1 Central Fotovoltaica da Amareleja

A Central Fotovoltaica da Amareleja é dotada de dois mil e quinhentos seguidores solares idênticos, sendo que cerca de quatrocentos e quarenta estão dispostos na zona mais periférica da Central, primeira “fileira”, e trezentos e oitenta na segunda “fileira”, da forma indicada na Figura 4.1.

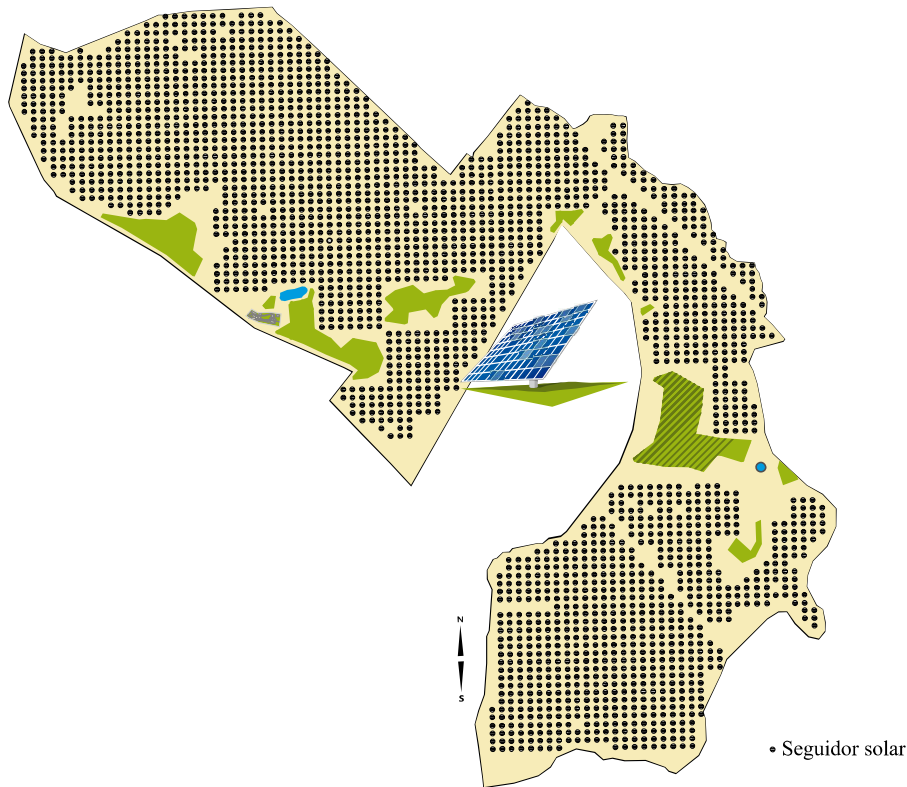


Figura 4.1: Planta da Central Fotovoltaica da Amareleja [2].

A área da Central Fotovoltaica é delimitada por uma simples vedação de rede que não confere nenhuma protecção, relativamente ao vento, aos oitocentos e vinte seguidores solares periféricos, localizados na primeira e segunda “fileiras”.

No estudo levado a cabo na presente dissertação não se entrou em consideração com a influência do “efeito de abrigo”, o que significa que os resultados a retirar desse estudo são mais fidedignos para os seguidores solares periféricos, ou seja, para os da primeira e segunda “fileiras” que se encontram mais próximas da linha de delimitação da área da Central (vd. §3.3).

4.2 Seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja

O tipo de seguidor solar da Central da Amareleja é comercialmente designado por *seguidor de um eixo azimutal Sti-A150* [4]. Trata-se de uma estrutura metálica, com a configuração apresentada nas Figuras 4.2 e 4.3, concebida para exclusivamente suportar os painéis fotovoltaicos e, como o nome indica, realizar o “seguimento” da trajectória do sol, ao longo do dia, de modo a maximizar o aproveitamento da luz solar.

4.2. Seguidor solar da Central Fovoltaica da Amareleja



Figura 4.2: Fotografia de alguns dos seguidores solares da Central da Amareleja mostrando os painéis fotovoltaicos.



Figura 4.3: Fotografia destacando um seguidor solar da Central da Amareleja, em que se observa a estrutura metálica.

4.2.1 Descrição dos elementos estruturais

O seguidor solar em estudo, cuja informação técnica está disponível no sítio (*site*, em inglês) da empresa *STi norland*, é representado na Figura 4.4 e as respectivas dimensões indicadas na Tabela 4.1. Segundo a informação técnica disponibilizada, a estrutura metálica do seguidor solar foi dimensionada de forma a resistir a um vento de velocidade máxima igual a 125 km/h (35 m/s).

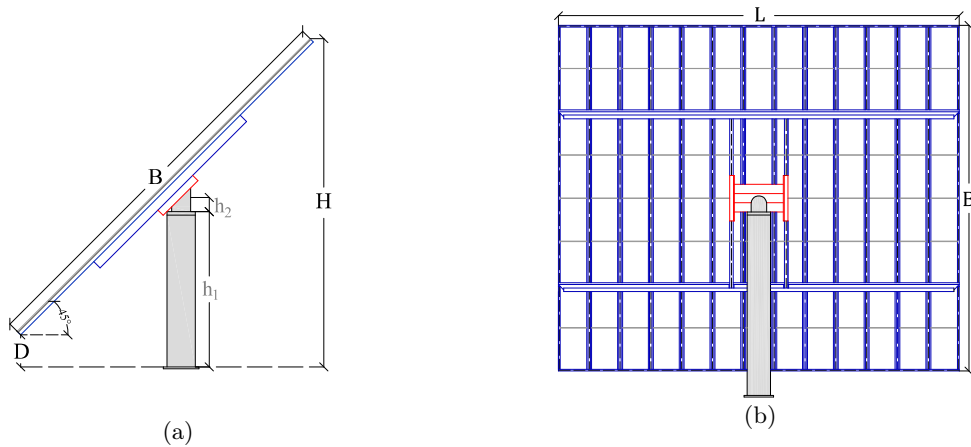


Figura 4.4: Figura esquemática do seguidor solar.

Tabela 4.1: Dimensões da estrutura do seguidor solar.

Altura total, H [m]	Distância ao solo, D [m]	Comprimento, L [m]	Largura, B [m]
8,60	0,80	13,12	11,27

A estrutura metálica do seguidor é composta por três componentes distintas: grupo coluna, cabeça do seguidor e suporte metálico. Na Figura 4.4 estas três componentes são ilustradas a cinzento, vermelho e azul, respectivamente. A seguir far-se-á a descrição de cada uma das componentes.

4.2.1.1 Grupo coluna e cabeça do seguidor

O grupo coluna e a cabeça do seguidor, que assenta sobre este, estão ilustrados, em conjunto, em duas perspectivas diferentes, na Figura 4.5.

O grupo coluna (GC) é formado por duas colunas de secção circular oca, de diâmetros distintos, entre as quais está intercalada a unidade de rotação (UR). A coluna de maior secção e comprimento h_1 tem de diâmetro $\varnothing 762$ mm e será designada, ao longo desta dissertação,

4.2. Seguidor solar da Central Fovoltaica da Amareleja

de coluna grande (CG). A coluna de menor secção e comprimento h_2 , coluna pequena (CP), tem um diâmetro de valor igual a Ø508 mm.

A cabeça do seguidor (CS) assenta sobre a coluna pequena e está inclinada de um ângulo θ de 45° com a horizontal. No entanto, esta componente pode rodar em torno do eixo longitudinal do grupo coluna até um ângulo de giração máximo de 240° .

A unidade de rotação (UR) é responsável pela rotação conjunta da cabeça do seguidor e do suporte metálico, que assenta nesta. A UR é dotada de um motor-reductor que, a cada cinco minutos, impõe uma rotação de um grau ao conjunto formado pelas referidas componentes.

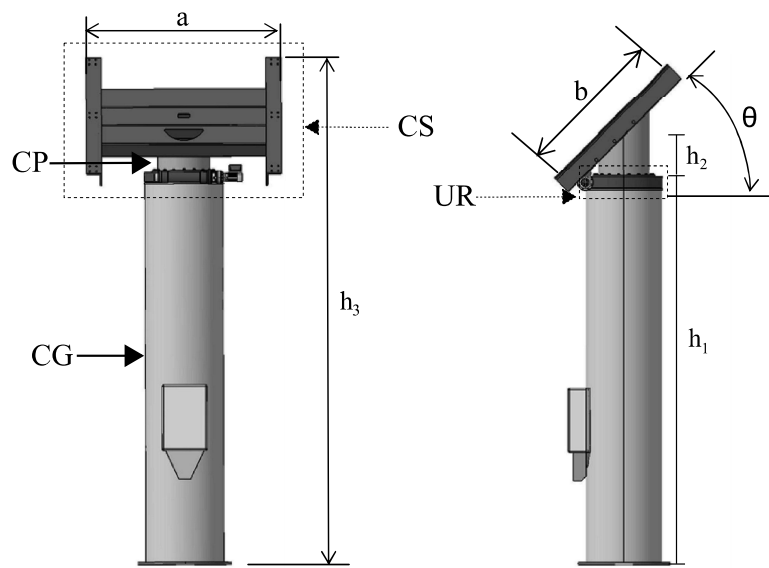


Figura 4.5: Componentes do grupo coluna e cabeça do seguidor [57].

As dimensões genéricas do grupo coluna e cabeça do seguidor estão indicadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dimensões do grupo coluna e cabeça do seguidor.

h_1 [m]	h_2 [m]	h_3 [m]	a [m]	b [m]	θ [°]
3,982	0,523	5,028	1,915	1,480	45

A cabeça do seguidor, representada com maior detalhe na Figura 4.6, é formada por três tubos rectangulares soldados entre si, conhecidos por “tubos facar” (TF), que estão confinados por dois perfis metálicos em L (cantoneiras). Os tubos facar e os perfis L estão soldados entre si. Cada tubo facar TF e cada cantoneira tem, respectivamente, dimensões $300 \times 200 \times 8$ mm e $L203 \times 152 \times 25,4$ mm. A caracterização geométrica das secções é apresentada no Anexo A.

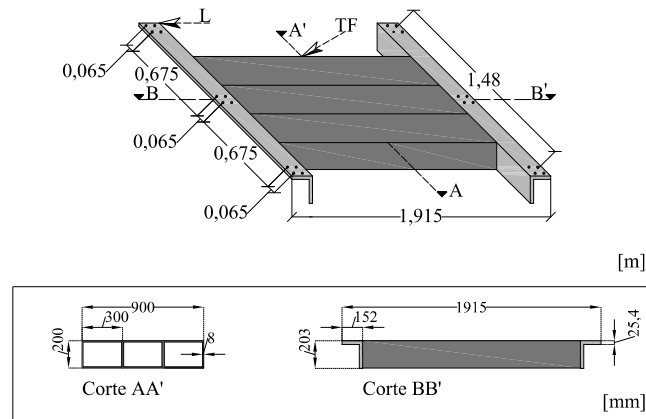


Figura 4.6: Dimensões da cabeça do seguidor.

As cantoneiras, em termos da concepção da estrutura do seguidor, são peças de “transição” que permitem a ligação entre a cabeça do seguidor e o suporte metálico. Do ponto de vista estrutural é de salientar que as duas cantoneiras têm o efeito de garantir o funcionamento conjunto dos três tubos rectangulares, conferindo-lhes maior resistência à torção.

A ligação da base da coluna grande à fundação (sapata de betão) é feita por meio de doze parafusos M30, como indicado na Figura 4.7. Pelas razões atrás referidas, não foram facultadas informações relativamente às dimensões da fundação.



Figura 4.7: Ligação da base da coluna grande à sapata de betão [57].

4.2.1.2 Suporte metálico

O suporte metálico pode ser considerado decomposto em duas partes: uma malha metálica e quatro perfis IPE 240.

Por necessidade de distinção individual, ao longo desta dissertação foram dadas as seguintes designações aos perfis IPE 240 representados na Figura 4.6: aos dois perfis transversais que

4.2. Seguidor solar da Central Fovoltaica da Amareleja

assentam directamente sobre os perfis L da cabeça do seguidor, aos quais são ligados por meio de vinte e quatro parafusos M16, foi dada a designação de vigas V3; aos perfis longitudinais, ligados às extremidades destas vigas, deu-se o nome, a um deles, de viga V1 e, ao outro, de viga V2. A atribuição da mesma nomenclatura aos dois perfis transversais está relacionada com o facto da distribuição da pressão de vento sobre a estrutura conduzir a esforços iguais neles. Esta situação não se verifica no caso dos perfis longitudinais, razão pela qual se atribuíram designações diferentes a ambos. As vigas V1 e V3 são contraventadas por perfis (TC) de secção tubular 50×50×5 mm.

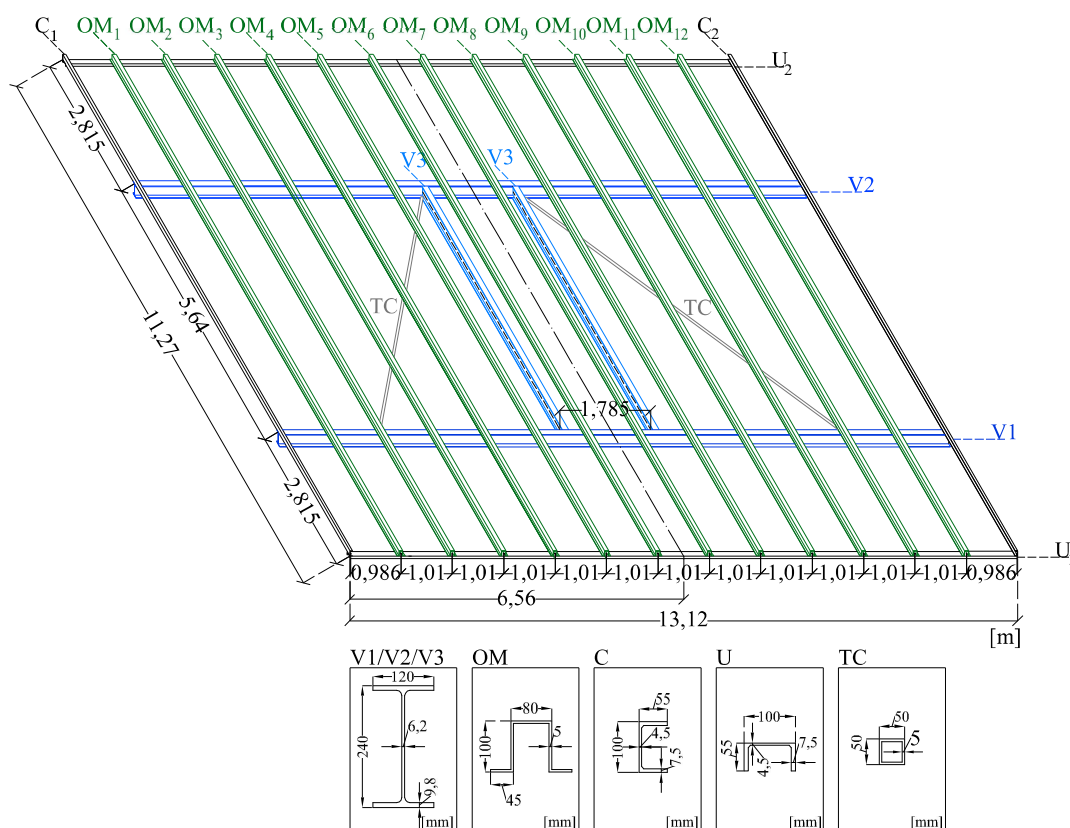


Figura 4.8: Configuração do suporte metálico.

A malha metálica, constituída por perfis de secção em C, OM e U, assenta sobre as vigas V1 e V2. Para facilitar o tratamento destes perfis, ao longo da exposição, foram atribuídas as designações que a Figura 4.8 mostra. Nesta figura pode ver-se as dimensões das secções dos perfis assinalados. Sobre os perfis C e OM estão colocados os painéis fotovoltaicos. Os perfis U₁ e U₂, que unem longitudinalmente os perfis C e OM, têm a função de tornar solidários estes elementos, contribuindo para a diminuição das deflexões nas extremidades.

Na Figura 4.9 pode visualizar-se a posição das vigas V1, V2 e V3 em relação à cabeça do seguidor. Na mesma figura pode ainda ver-se quatro dos doze perfis OM.

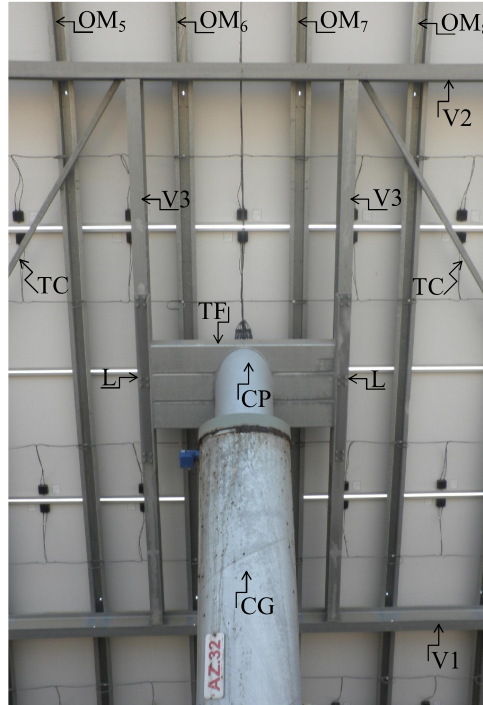
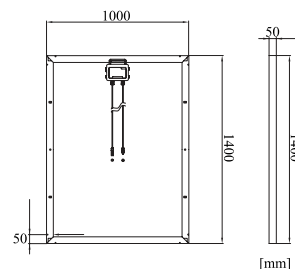
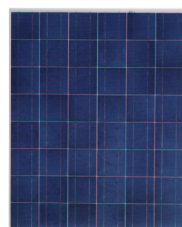


Figura 4.9: Posição das vigas V1, V2 e V3 em relação à cabeça do seguidor.

4.2.1.3 Painéis fotovoltaicos

No que concerne aos painéis fotovoltaicos, dentre a informação que foi possível obter, serão apresentados apenas os aspectos considerados relevantes para o presente estudo. Os painéis fotovoltaicos, da série comercial *YGE 48 Cell Series*, têm as dimensões que se apresentam na Figura 4.10 [5].



(a) Aspecto de um painel fotovoltaico (b) Dimensões de um painel fotovoltaico

Figura 4.10: Painel fotovoltaico da Central Fotovoltaica da Amareleja [5].

4.2. Seguidor solar da Central Fovoltaica da Amareleja

Estes painéis foram fabricados exclusivamente para a Central Fotovoltaica da Amareleja. A informação técnica a eles respeitante não se encontra disponível no sítio da empresa da *Yingli Solar*. Consultando directamente esta empresa, a única informação facultada foi a que se refere ao peso de cada painel cujo valor é 0,16 kN.

Sobre cada seguidor solar estão fixados cento e quarenta painéis fotovoltaicos, com um afastamento entre si de aproximadamente 0,01 m (10 mm). A área de exposição dos painéis ao vento é 145,6 m² e a área total de aberturas 2,26 m².

Como já foi referido, os painéis fotovoltaicos assentam sobre a malha metálica, sendo aparafusados, em cada um dos seus cantos, a um perfil OM e/ou C. A Figura 4.11 procura ilustrar a ligação dos painéis periféricos ao perfil C_1 (ligação L_C) e a perfis OM (ligação L_{OM}) e dos painéis interiores a perfis OM (ligação L_{OM}).

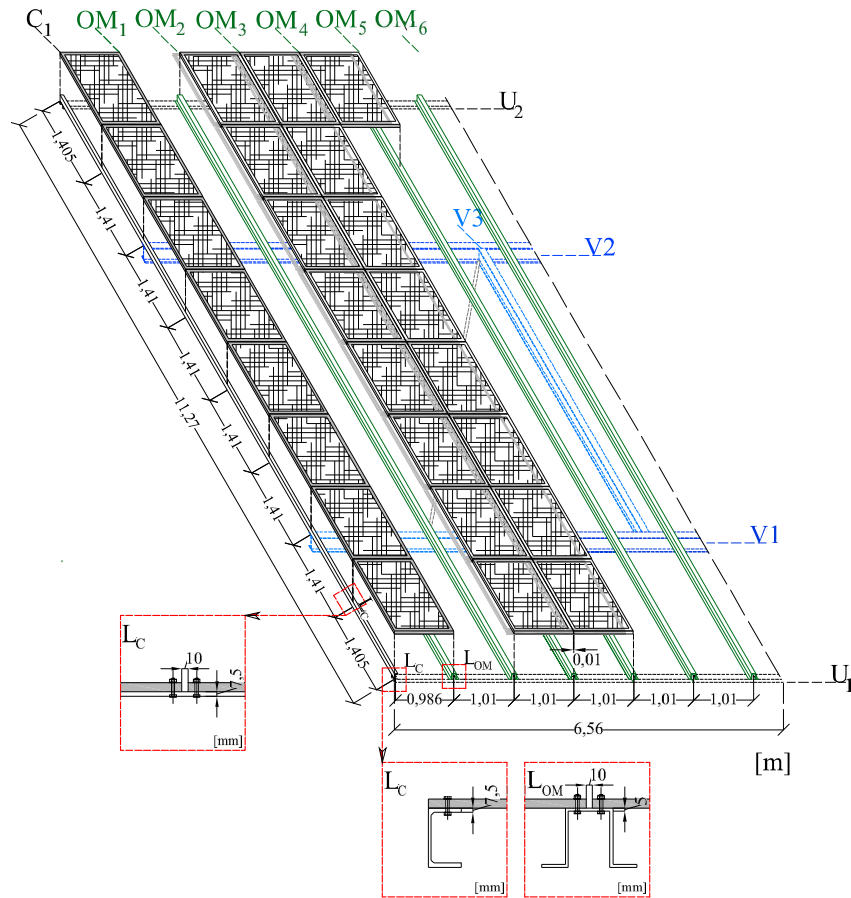


Figura 4.11: Disposição dos painéis fotovoltaicos.

4.2.1.4 Ligações

Neste parágrafo será feita a descrição das diferentes tipologias de ligação entre os elementos do seguidor solar.

A ligação entre a coluna pequena e os tubos facar, assim como entre estes últimos e os perfis L, foi efectuada por soldadura. A Figura 4.12 mostra este tipo de ligação, designada de L_s , entre a coluna pequena e os tubos facar e entre estes e um dos dois perfis L. Como é assinalado nesta figura, cada um dos dois perfis L está ligado em três sítios diferentes a uma viga V3, sendo cada uma das ligações efectuada por meio de quatro parafusos M16 de classe 10.9. Ao longo desta dissertação, cada uma das seis ligações existentes entre os dois perfis L e as duas vigas V3 recebe o nome de ligação L_1 . Na Figura 4.12 é ainda visível a ligação entre uma das vigas V3 e a viga V2. A esta ligação, cuja descrição será feita a seguir, deu-se o nome de ligação L_2 .

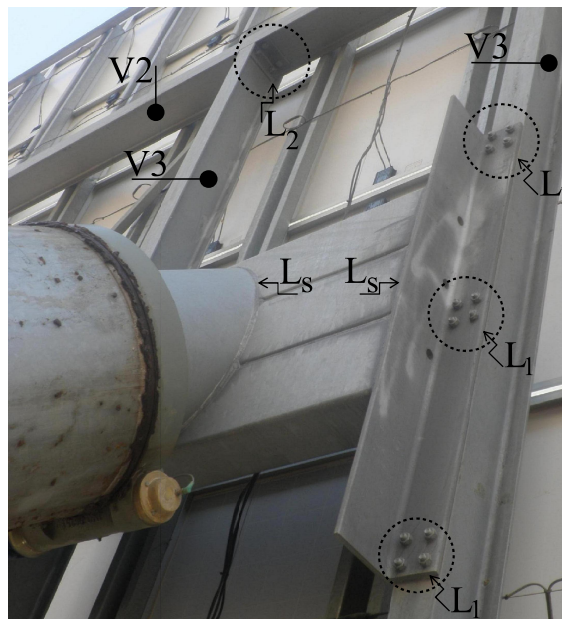


Figura 4.12: Ligação soldada, L_s , e ligações L_1 e L_2 .

A ligação com dupla cantoneira de alma entre a viga V1, ou V2, e cada uma das vigas V3 é feita por meio de seis parafusos M20 de classe 10.9. No que se segue, esta ligação será denominada de ligação L_2 . Na Figura 4.13(a) é possível visualizar dois dos seis parafusos desta ligação, entre a viga V1 e as vigas V3, e na Figura 4.13(b) os restantes quatro. Na documentação técnica facultada pela empresa não consta a informação relativa à espessura da chapa utilizada para executar esta ligação.

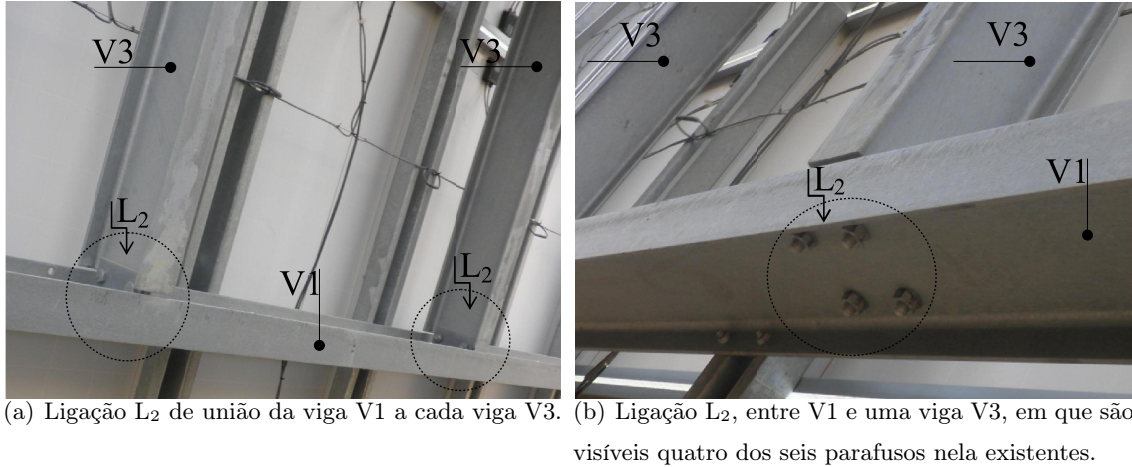


Figura 4.13: Ligação L_2 entre as vigas V1 e V3.

A ligação de um perfil OM ou C à viga V1 ou V2 realiza-se por meio de dois parafusos M12 de classe 10.9 e será designada de ligação L_3 . Na Figura 4.14 é apresentada esta ligação no caso particular de um perfil OM e a viga V1.

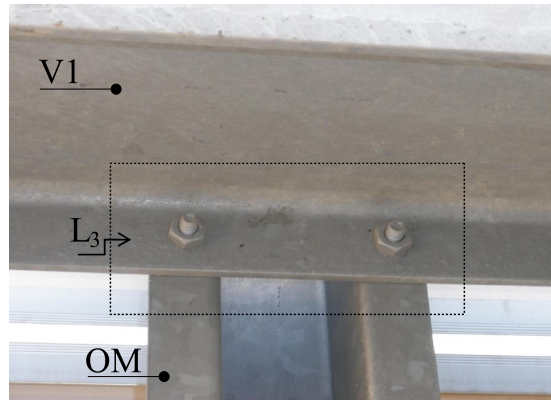


Figura 4.14: Ligação L_3 entre um perfil OM e a viga V1.

A ligação entre cada um dos perfis longitudinais U (U_1 e U_2) e a extremidade de cada um dos perfis OM é feita por meio de dois parafusos do tipo M12 de classe 10.9 e recebe a designação de ligação L_4 . Na Figura 4.15(a) mostra-se esta ligação entre um dos perfis OM e o perfil U_1 .

A ligação de um perfil C a um perfil U (ligação $L_{4'}$) é realizada por um único parafuso M12. Na Figura 4.15(b), ainda que não seja possível visualizar o parafuso que a realiza, assinala-se, para o caso dos perfis C_1 e U_1 a posição desta ligação.

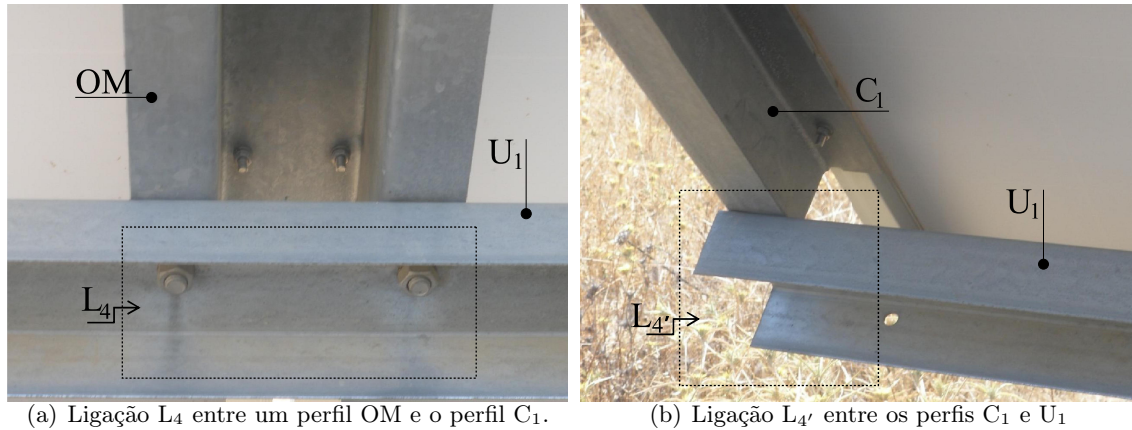


Figura 4.15: Ligação L_4 entre um perfil OM e o perfil C_1 e ligação $L_{4'}$ entre os perfis C_1 e U_1 .

Cada uma das ligações dos perfis tubulares TC às vigas V1 e V2, designada de ligações L_5 , é realizada por um parafuso M16 de classe 10.9. A Figura 4.16 assinala este tipo de ligação entre um dos perfis tubulares TC e a viga V1.

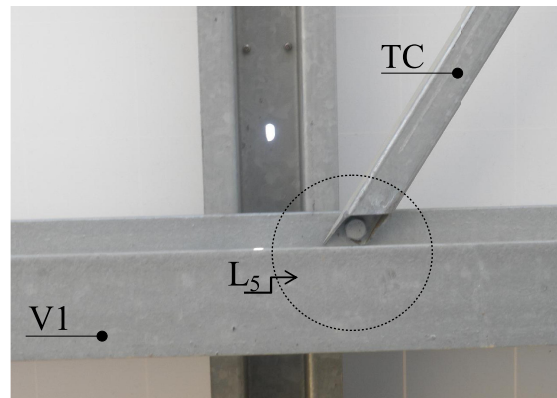


Figura 4.16: Ligação L_5 entre um tubo TC e a viga V1.

Não foi conseguida informação sobre a tipologia da ligação aparafusada entre os painéis fotovoltaicos e os perfis C e OM. Como se pode verificar pela Figura 4.11 a ligação entre os painéis fotovoltaicos e os perfis C, ligação L_C , e OM, ligação L_{OM} , é em geral efectuada por dois parafusos, excepto nos quatro cantos correspondentes aos quatro vértices da malha metálica em que a ligação L_C é feita por um único parafuso.

4.2.2 Caracterização mecânica dos materiais

Nos parágrafos que se seguem são referidas as propriedades mecânicas dos aços dos elementos estruturais, que constituem o seguidor solar, e das respectivas ligações.

4.2.2.1 Seguidor solar

Na concepção da estrutura metálica do seguidor solar foi utilizado aço laminado a quente, mais concretamente, aço S 275 no grupo coluna (coluna grande e pequena), cabeça do seguidor (tubos facar e perfis L) e vigas V1, V2 e V3 e aço S 235 no suporte metálico (perfis C, OM e U e tubos TC).

As principais propriedades dos aços S 235 e S 275, nomeadamente os valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão de rotura à tracção, f_u , são indicadas no Eurocódigo 3, Parte 1-1 [58], e resumidamente apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão de rotura à tracção, f_u [58].

Classe de aço	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
S 235	235	360
S 275	275	430

Relativamente aos aços referidos são ainda mencionadas as propriedades complementares que constam na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores de cálculo de outras propriedades do aço estrutural [58].

Propriedades do aço estrutural		
Módulo de elasticidade	E	210 000 [N/mm ²]
Módulo de distorção	G_a	81 000 [N/mm ²]
Coefficiente de Poisson em regime elástico	ν	0,3
Massa volúmica	ρ_a	7850 [kg/m ³]

4.2.2.2 Ligações

Os aços das ligações por parafusos e por soldadura possuem propriedades de carácter mais específico e são definidas na Parte 1-8 do Euródigo 3 [59]. Os valores nominais da tensão de cedência, f_{yb} , e da tensão de rotura à tracção, f_{ub} , dos parafusos de classe 10.9 são, respectivamente, 900 N/mm² e 1000 N/mm².

Em relação às ligações soldadas, refira-se simplesmente que o metal de adição (cordão de soldadura) deve apresentar propriedades mecânicas idênticas às do metal base da estrutura. Não havendo informação relativa a esta matéria na documentação técnica que foi disponibilizada pela empresa *Amper Central Solar, SA*, as ligações L_5 não serão objecto de análise e verificação no âmbito do estudo efectuado nesta dissertação.

4.2.2.3 Painéis fotovoltaicos

Não é do âmbito deste trabalho o estudo da resistência mecânica dos painéis fotovoltaicos à acção do vento. Ainda que se tivesse pretendido realizar esse estudo ele não seria possível, já que não foi cedida informação pela Amper Central Solar, SA, sobre as propriedades mecânicas dos painéis e estas não se encontram disponíveis na *internet*, no sítio da empresa que os comercializou. No entanto, pode adiantar-se que qualquer tipo de painel fotovoltaico quando submetido à acção do vento tem um comportamento frágil. A título de referência, apresentam-se a seguir as propriedades mecânicas de um painel fotovoltaico das indústrias Thompson, San Rafael, Califórnia [60]. Segundo esta referência, o módulo de elasticidade destes painéis é aproximadamente igual a 690 N/mm^2 (690 MPa) e o coeficiente de Poisson é 0,3. Estes valores permitem ter uma estimativa aproximada das propriedades mecânicas dos painéis fotovoltaicos.

4.2.3 Caracterização geométrica das secções

As características geométricas e as propriedades mecânicas de cada secção transversal dos elementos metálicos que constituem o seguidor solar são apresentadas no Anexo A.

4.3 Modelo estrutural

Neste parágrafo apresenta-se o modelo estrutural que, de forma simplificada, se pretende representativo do comportamento fidedigno da estrutura e referem-se as hipóteses simplificativas que foram assumidas na elaboração do mesmo. O referido modelo foi concebido no programa de elementos finitos SAP2000® com o intuito de analisar os efeitos da acção do vento que se exerce directamente sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos.

Pelos motivos já referidos, no estudo efectuado desprezou-se a resistência mecânica dos painéis fotovoltaicos quando submetidos à acção do vento. Nesta condição, admite-se que a acção do vento que se exerce sobre a superfície dos painéis é traduzida por forças, que actuam directamente sobre os perfis C e OM. Igualmente, o peso próprio de cada painel, PP_{painel} , é também reduzido a um conjunto de forças pontuais verticais que “descarregam” nos perfis C e OM. Esta simplificação de análise é ilustrada na Figura 4.17.

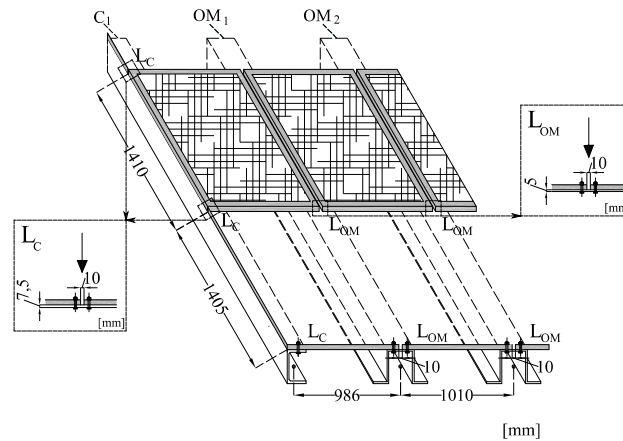


Figura 4.17: Forças do vento transmitidas aos perfis C e OM.

A força do vento que se exerce perpendicularmente aos painéis fotovoltaicos, assim como a força vertical relativa ao peso dos painéis, são transmitidas aos perfis C e OM nos pontos de ligação dos painéis a estes últimos perfis (L_C e L_{OM}). Estes pontos estão situados em cada um dos cantos dos painéis fotovoltaicos. Os pontos de ligação situados em dois cantos contíguos de dois painéis adjacentes estão separados de uma distância de aproximadamente 10 mm e, como tal, os pontos de aplicação das forças pontuais transmitidas nesses pontos de ligação terão igual separação. Dada a complexidade em representar forças no modelo estrutural com um afastamento entre si tão pequeno, foi admitida a seguinte hipótese simplificativa:

- As forças exercidas em dois cantos contíguos situados sobre um perfil C ou em quatro cantos contíguos ligados a um perfil OM, consideram-se, em cada um dos casos, aplicadas num único ponto equidistante dos correspondentes cantos (Figura 4.17).

Com o objectivo de elaborar no programa SAP2000[®] o modelo estrutural que melhor permitisse analisar os efeitos da acção do vento sobre o seguidor solar procurou-se entender o “caminho” através do qual as forças devidas ao vento são transmitidas dos painéis à fundação da estrutura. Esta análise é apresentada em Anexo E. Neste Anexo, são indicadas ainda as dimensões dos elementos estruturais que foram consideradas necessárias para a elaboração do modelo, assim como as nomenclaturas atribuídas às secções mais relevantes da estrutura.

► **SAP2000 v14.0.** Previamente à concepção do modelo no programa SAP2000[®] foi necessário compreender a localização dos eixos longitudinais dos diferentes elementos estruturais e a forma como serão materializadas as ligações entre eles no referido programa.

No modelo estrutural introduzido no programa SAP2000[®], a estrutura metálica do seguidor solar (CG, CP, TF, vigas V1, V2 e V3 e perfis C, L, OM e U) foi modelada representando cada um dos seus elementos estruturais por um elemento de barra linear ou elemento *frame*. Este elemento coincide com o eixo longitudinal do respectivo elemento estrutural o qual passa pelo centro de gravidade deste.

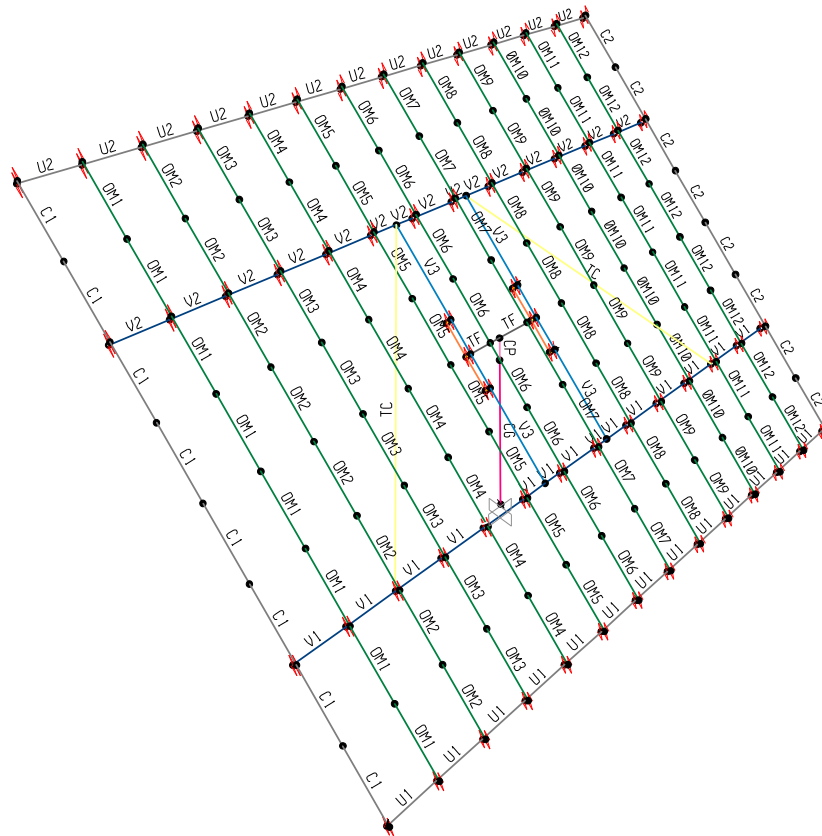


Figura 4.18: Representação do modelo estrutural do seguidor em SAP2000.

A cada um dos elementos *frame* indicados na Figura 4.18 atribuíu-se, no programa, a respectiva forma e dimensão da secção transversal e as propriedades do material indicadas nas Tabelas 4.3 e 4.4. O programa SAP2000[®] dispõe de uma base de dados com as secções transversais de perfis metálicos correntes. Todavia, o tipo de secção transversal dos perfis OM e dos tubos facar não estão incluídos nesta base de dados. Houve, assim, a necessidade de definir estas secções usando para tal a opção *Section Designer*.

A obtenção do modelo estrutural no programa SAP2000[®] obedeceu ainda a condições de índole mais específica que seguidamente se apresenta.

- No modelo de análise adoptado, os três tubos facar, soldados entre si, são representados por uma peça única cuja secção transversal é apresentada na Figura A.6.
- Ao considerar a representação dos perfis metálicos por elementos *frame* há algumas particularidades na modelação das ligações L_1 , L_3 , L_4 e $L_{4'}$ referidas em §4.2.1.4 que importa mencionar. Ao representar os perfis metálicos no modo indicado é necessário garantir que seja respeitada a distância entre os respectivos eixos longitudinais, pois estes não podem sobrepor-se no modelo.

No programa SAP2000[®], as ligações L_1 , L_3 , L_4 e $L_{4'}$, entre os respectivos elementos estruturais, foram materializadas por elementos do tipo mola, designados, no programa, de *Link*. Na interface *Link/Support* atribuiu-se aos elementos *Link* uma massa e peso de valores zero e definiram-se as condições que caracterizam o comportamento das referidas ligações, tal como a seguir se indica.

Utilizando a ferramenta *Link* para materializar a ligação L_3 de cada perfil C ou OM a uma das vigas V1 e V2 e as ligações L_4 e $L_{4'}$ entre os perfis U e os perfis OM e C, respectivamente, criou-se um elemento *Link1*¹. A Figura 4.19 mostra a ligação dos perfis C_1 , OM_1 , OM_2 e OM_3 à viga V2, realizada através do elemento *Link1*, assim como os eixos locais (direcções 1, 2 e 3) dos elementos *frame* C e OM e do *Link1* predefinidos no programa SAP2000[®].

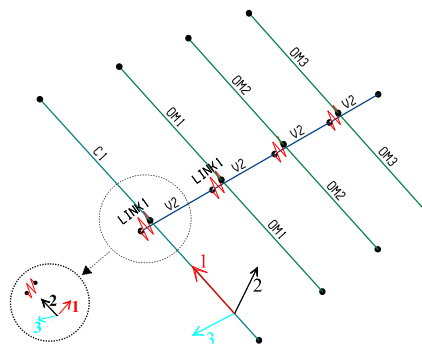


Figura 4.19: Ligação L_3 traduzida no programa SAP2000[®] por um elemento *Link1*.

Para modelar a ligação aparafusada L_3 , assim como as ligações L_4 e $L_{4'}$, foram impedidos todos os deslocamentos segundo as direcções 1, 2 e 3, indicadas na Figura 4.19, assim

¹No programa SAP2000 é necessário proceder aos seguintes passos: *Define*→ *Section Properties*→ *Link/Support properties*.

como foi restringida a rotação segundo a direcção 3, de forma a impedir que ocorram rotações relativas entre os referidos perfis.

De forma semelhante, modelou-se a ligação L_1 entre os pontos L, M e N das cantoneiras e os pontos H, I e J das vigas V3, através de elementos *Link*. Para modelar esta ligação recorreu-se a dois elementos *Link* distintos, *Link2* e *Link3*. As ligações entre as cantoneiras e as vigas V3 foram modeladas por elementos *Link3* nos pontos L e N e por elementos *Link2* nos pontos M, indicados na Figura 4.20.

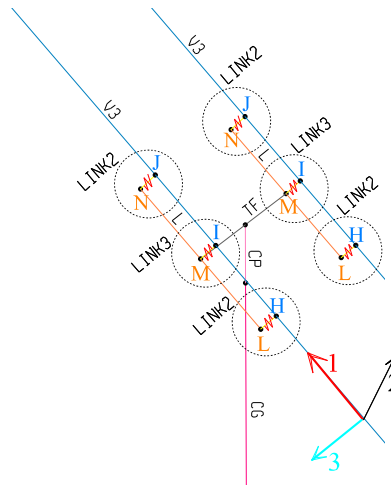


Figura 4.20: Representação da ligação L_1 por meio de elementos *Link2* e *Link3*.

Na definição do elemento *Link2* foram restringidos todos os deslocamentos e rotações, segundo as direcções 1, 2 e 3, admitindo-se assim que a ligação L_1 no ponto M é rígida. No elemento *Link3* optou-se por impedir os deslocamentos segundo todas as direcções e, adicionalmente, a rotação segundo o eixo 1.

A ligação L_2 , de cada uma das vigas V1 e V2 a uma viga V3, como já foi referido, é enquadrada na tipologia de ligações designadas de “viga-viga com dupla cantoneira de alma”. Este tipo de ligação é concebido para resistir essencialmente a esforços de corte e, de acordo com a bibliografia especializada na matéria, é usual que ela se comporta como um nó articulado. No modelo estrutural, tal hipótese não foi admitida e considerou-se, então, que a ligação entre as vigas referidas é contínua, havendo total transmissão de esforços entre si.

- A união entre a coluna grande e coluna pequena é efectuada pela unidade de rotação. Esta ligação entre os referidos elementos estruturais é de extrema importância relativamente ao comportamento global da estrutura, mas também de extrema complexidade.

O estudo do seu comportamento não é do âmbito desta dissertação, pelo que, de forma simplificada, ela é materializada por uma ligação perfeitamente rígida.

A ligação da coluna pequena à cabeça do seguidor é feita por meio da soldadura desta coluna aos tubos facar. Para efeitos de modelação, esta ligação é também idealizada como perfeitamente rígida.

- Ao considerar que os perfis metálicos são representados por elementos *frame*, é preciso ter em consideração a disposição relativa das vigas V1, V2, perfis U e tubos facar, em face da globalidade da estrutura. O programa SAP2000, por defeito, dispõe as secções transversais dos elementos estruturais perpendicularmente à direcção definida para os respectivos eixos longitudinais dos referidos elementos.

Ao definir na “grelha” do SAP2000® a direcção dos elementos *frame* que representam os tubos facar, as vigas V1 e V2 e perfis U, em conformidade com os eixos longitudinais destes elementos (direcção horizontal), o programa dispõe automaticamente as respectivas secções transversais na vertical. No entanto, estas estão inclinados de 45° em relação à horizontal. Por conseguinte, para traduzir esta inclinação, é necessário rodar adequadamente os *frame* destes elementos de 45°². No caso das vigas V1 e V2, esta alteração é de fulcral importância. É de notar que os banzos destas secções estão dispostos paralelamente aos perfis C e OM, ou seja, inclinados a 45°. Uma outra disposição da secção transversal destes perfis conduziria a uma distribuição de esforços diferentes nas vigas V1 e V2.

- A fundação da estrutura foi materializada por um encastramento perfeito. No programa SAP2000 impediram-se³ todas as rotações e deslocamentos na base da coluna grande.

²Esta rotação no programa SAP2000 corresponde a efectuar a alteração dos eixos locais (*Local Axes*) pré-definidos do seguinte modo: com o botão direito do rato sobre o elemento *frame* pretendido, altera-se os *Local Axes* e atribui-se uma rotação de 45° em torno do eixo longitudinal (*Rotation about 1*).

³Na interface gráfica do SAP2000® foram realizados os seguintes comandos: seleccionou-se o ponto pretendido, ponto S da base da coluna grande, e na opção *Assign/Joint/Restraints*, escolheu-se o apoio/*Restraints* que impede todas as rotações e deslocamentos.

4.4 Definição das acções

As acções no seguidor solar a considerar são: o peso próprio da estrutura, calculado directamente pelo programa SAP2000, e dos painéis fotovoltaicos, que no seu conjunto representam as *acções permanentes*, e a pressão do vento sobre os painéis fotovoltaicos que traduz a *acção variável*. A determinação desta é feita mediante dois processos alternativos: cálculo da força estática do vento segundo a norma ASCE/SEI 7-10 e obtenção da força dinâmica do vento, variável no tempo, com recurso a séries temporais definidas com base no método WAWS e simuladas numericamente em Matlab.

Na aplicação da norma ASCE/SEI 7-10, a fim de determinar a pressão do vento sobre os painéis, foram tidas em consideração algumas das sugestões apresentadas pelo Doutor David Banks. O uso desta norma suscitou algumas dúvidas à autora da presente dissertação. No sentido de esclarecimento das mesmas, contactou o Doutor David Banks, que lidera desde 2009 os projectos de estudo da acção do vento sobre seguidores solares na empresa *CPP, Cermak Peterka Petersen* sediada em Colorado, USA, e tem várias publicações neste domínio.

Antes de efectuar a determinação da acção do vento pelos dois processos alternativos anteriormente referidos, são feitas a seguir algumas considerações sobre o modo como foram traduzidas no modelo estrutural as forças que se exercem nos painéis. Neste modelo, considerou-se que a força do vento que actua num painel, assim como o peso deste, é “descarregada” igualmente sobre os perfis C e OM em quatro nós i , que representam as ligações destes a esse painel. Na determinação das forças F_i do vento sobre os nós i teve-se em consideração a área de influência A_i desses nós, apresentadas na Figura 4.21, assim como a distribuição da pressão do vento sobre *coberturas isoladas de uma vertente* proposta na norma ASCE, que pode ser vista na Figura 3.14. Nesta figura, para os dois sentidos I e II do vento devem ser admitidas as duas distribuições de pressão nela consideradas, que são designadas, nesta norma, por casos A e B.

A força do vento F_i em cada nó i é

$$F_i = p \cdot A_i \quad (4.1)$$

sendo p a pressão do vento. No nó i foi ainda considerada a força associada ao peso dos painéis, a qual foi obtida admitindo que o peso de cada painel de 0,16 kN é traduzido por quatro forças pontuais de valor 0,04 kN nos quatro nós que definem a ligação do painel aos perfis da malha metálica.

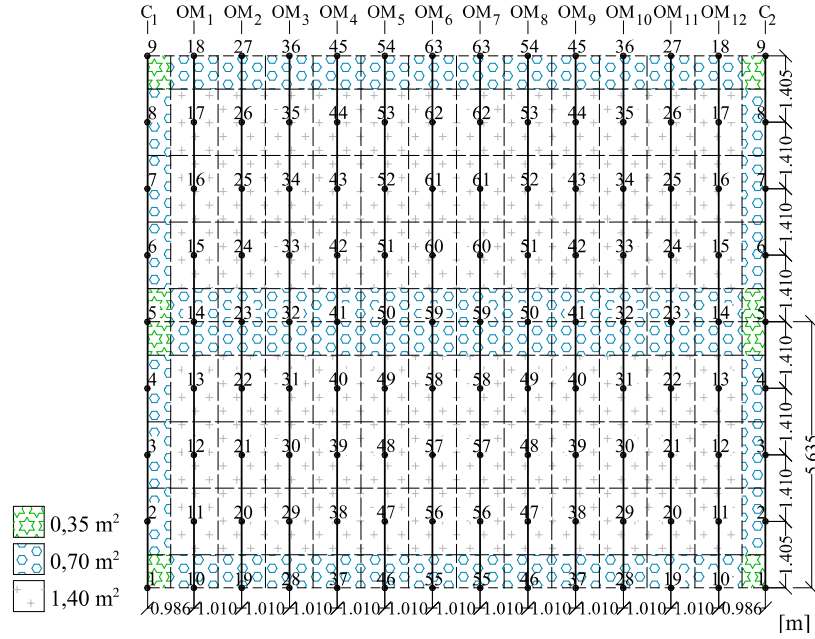


Figura 4.21: Área de influência de cada nó i .

4.4.1 Determinação da pressão do vento segundo a norma ASCE/SEI 7-10

A pressão do vento p , sobre os painéis fotovoltaicos, foi obtida a partir da relação 3.3 que dá o valor desta grandeza sobre uma *cobertura isolada de uma vertente*, de acordo com a norma ASCE. Esta relação, a seguir indicada, traduz a pressão p em função dos seguintes parâmetros já definidos em §3.4.1: pressão dinâmica à altura média da cobertura, $q(h)$, coeficiente estrutural, G , e coeficiente de pressão resultante, c_p .

$$p = q(h) \cdot G \cdot c_p$$

Para obter a pressão dinâmica $q(h)$ importa conhecer a velocidade de rajada, V , relativa a 3 s, a 10 m acima de um terreno de tipo aberto. Assim, procurou-se obter esta velocidade para a região da Amareleja.

Velocidade de rajada do vento, V

No projecto de estruturas, para efeitos de quantificação da velocidade do vento a nível nacional, é usual recorrer ao Anexo Nacional que complementa o Eurocódigo 1. Este documento [27], considera o País dividido em duas zonas, Zona A e Zona B, e, a cada uma, atribui um valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de dez minutos, a uma

altura de 10 m acima de um terreno do tipo campo aberto. O valor de referência da velocidade do vento para a zona A, Portugal Continental, é de 27 m/s.

Na ausência de informação sobre os registos meteorológicos de velocidades de rajada de três segundos no Anexo Nacional, procurou-se obter directamente estes dados, relativamente à estação meteorológica da Amareleja, no Instituto de Meteorologia, IP Portugal. Não dispondo este Instituto desses dados, facultou os registos da velocidade média do vento, na referida estação, entre o ano 1963 e 1980 (dezassete anos). Estes registos encontram-se na Figura B.1 do Anexo B. No entanto, disponibilizou os registos da velocidade de rajada para a estação meteorológica mais próxima da Amareleja, a de Beja, afastada de aproximadamente 90 km daquela. Estes registos são apresentados nas Figuras B.3-B.5 do Anexo B. Nestas figuras verifica-se que, entre o ano 1957 e 2000, as velocidades máximas instantâneas estão compreendidas entre 21 m/s e 41 m/s. Apesar destes valores não traduzirem, provavelmente, a situação meteorológica actual, eles podem ser uma referência sobre a possível ordem de grandeza da velocidade média e de pico do vento nessa zona.

Na ausência de informação actualizada relativa ao valor da velocidade de rajada na zona da Amareleja e sendo o Anexo Nacional, que complementa o Eurocódigo 1, o documento em vigor que define a velocidade do vento em Portugal Continental seguido no projecto de estruturas, considerou-se, como ponto de partida para a determinação de V , uma velocidade média do vento relativa a períodos de dez minutos, \bar{v}_{10min} , de 27 m/s, na zona da Amareleja. É de salientar que o Anexo Nacional considera uma mesma velocidade média em todo o território continental. Embora em algumas regiões o valor de 27 m/s adoptado no Anexo Nacional seja coerente com as velocidades registadas nos anemómetros⁴, em outras está longe de ser representativo.

Como não foi encontrada informação sobre o valor da velocidade de rajada *in loco*, o valor desta grandeza foi obtido a partir do factor de rajada definido em §2.2.1. Determinou-se a velocidade de rajada correspondente a três segundos, V , a partir da velocidade média relativa a dez minutos (seiscentos segundos), $\bar{v}_{600s} = 27$ m/s, pela relação

$$V = G_v^{3s}(600 \text{ s}) \cdot \bar{v}_{600s}$$

em que $G_v^{3s}(600 \text{ s})$ é obtida da fórmula de Solari, correspondente à equação 2.7. O cálculo de $G_v^{3s}(600s)$ envolve a determinação das grandezas $g_v(3 \text{ s})$, $\tilde{\tau}$, \tilde{T} , P_0 e P_1/P_0 , dadas pelas equações 2.8, 2.11, 2.12, 2.9 e 2.10, respectivamente. A intensidade de turbulência, $I_v(z)$, e a escala de turbulência, $L_v(z)$, que surgem nas relações anteriores, foram obtidas a partir da

⁴Um anemómetro consiste no instrumento que permite medir a velocidade do vento *in loco*.

norma ASCE, apresentada em §3.4, para um terreno de categoria C, ou seja, de campo aberto, que se considera representativo do local onde se situa a Central Fotovoltaica da Amareleja. Do valor das referidas grandezas, 0,20 e 152,4 m, respectivamente, obtém-se: $\tilde{\tau} = 0,53$, $\tilde{T} = 106,30$, $P_1/P_0 = 0,08$, $P_0 = 0,74$ e $g_v(3s) = 2,82$. Estes resultados conduzem a um valor de factor de rajada $G_v^{3s}(600s) = 1,48$, de que resulta uma velocidade de rajada V de três segundos igual a 40 m/s.

Pressão dinâmica, $q(h)$

A pressão dinâmica do vento à altura média $z = h$, $q(h)$, é dada pela equação 3.5, em função dos coeficientes de rugosidade, $c_r(h)$, de orografia, c_o , de direcção, c_{dir} , e da velocidade de rajada do vento, V .

Para o cálculo de $c_r(h)$ considerou-se a equação 3.7, admitindo para valor de h a altura média da superfície ocupada pelos painéis ($h = 4,7$ m) e para valores de α e z_g os indicados na Tabela 3.3 para um terreno de tipo C. O valor de $c_r(h)$ assim obtido é 0,85. O coeficiente de orografia, para o tipo de terreno em questão, é $c_o = 1$. Segundo a norma ASCE, o valor do coeficiente direccional é $c_{dir} = 0,85$.

Atendendo aos valores dos parâmetros referidos, obtém-se, a partir da equação 3.5, $q(h) = 0,73$ kN/m².

Coeficiente estrutural, G

De acordo com as considerações efectuadas em §3.4.1.2, a norma ASCE/SEI 7-10 prevê duas expressões para G , mediante a classificação da estrutura em *rígida* ou *flexível*, baseadas no valor da frequência fundamental da estrutura, f_n .

A fim de saber qual a expressão a adoptar para G no caso da estrutura do seguidor solar, efectuou-se uma análise modal à mesma, no programa de cálculo automático SAP2000. Esta análise permitiu determinar as frequências próprias da estrutura, verificando-se que estas estão compreendidas entre 1,30 Hz e 6,66 Hz. Para $f_n = 1,30$ Hz, de acordo com a norma ASCE, a estrutura é *rígida*. Nestas condições, o valor de G foi determinado pela equação 3.8 do §3.4.2. Usando esta equação e atendendo às equações 3.9-3.11, aos valores dos parâmetros c , ℓ e \bar{e} de um terreno de categoria C indicados na Tabela 3.3, ao valor $h = 4,7$ m e à dimensão do seguidor $L = 13,12$ m, para a altura de referência $z_s = 4,57$ m obteve-se que $G = 0,88$. No entanto, segundo David Banks, para um seguidor solar deve ser adoptado o valor 1,0 já que o coeficiente estrutural definido pela ASCE/SEI 7-10 não conduz a valores representativos da interacção “vento - seguidores solares”. Segundo este autor, as estruturas do tipo seguidor solar

não podem ser classificadas em *rígidas* e *flexíveis* segundo o critério estipulado pela ASCE, já que este foi estabelecido pelos seus autores para estruturas esbeltas, do tipo arranha-céus. Miller e Zimmerman [19] consideram que os seguidores solares têm um comportamento *flexível* para uma frequência f_n entre 4 e 5 Hz e *rígido* a partir desta frequência. Também segundo estes autores o valor de G não deve ser inferior a 1,0. Pelo exposto, adoptou-se o valor $G=1,0$.

Coefficientes de pressão c_p

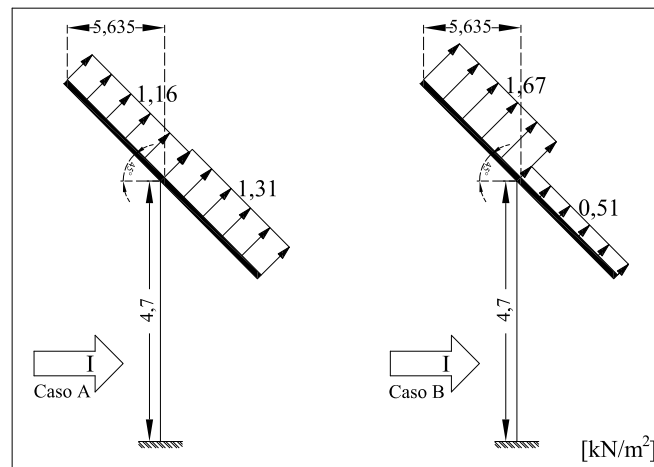
Como citado em §3.1 foram atribuídos aos painéis fotovoltaicos os coeficientes de pressão dados pela norma ASCE/SEI 7-10 para o caso de estruturas do tipo *coberturas isoladas de uma vertente*. Na presente dissertação, os coeficientes c_p , referentes às distribuições de pressão consideradas na Figura 3.14, são dados na Tabela 3.4.

Forças do vento nos nós i dos perfis C e OM

Com base no valor de $q(h)$, do coeficiente G e dos valores dos coeficientes de pressão da Tabela 3.4 obtiveram-se os valores da pressão do vento sobre os painéis, dados na Tabela 4.5, para as quatro situações consideradas (sentido I e II do vento e casos A e B). Nas Figuras 4.22(a) e (b) mostram-se os correspondentes diagramas de pressão.

Tabela 4.5: Pressão do vento sobre a superfície do seguidor solar, $p = q(h) \cdot G \cdot c_p$ [kN/m²].

Caso	Sentido I		Sentido II	
	$q \cdot G \cdot c_{p1}$	$q \cdot G \cdot c_{p2}$	$q \cdot G \cdot c_{p1}$	$q \cdot G \cdot c_{p2}$
A	-1,16	-1,31	1,60	1,81
B	-1,67	-0,51	1,89	1,02



(a) Sentido I do vento.

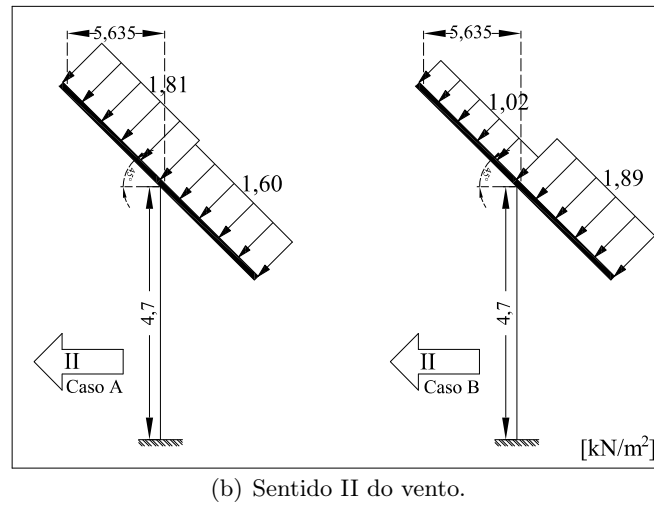
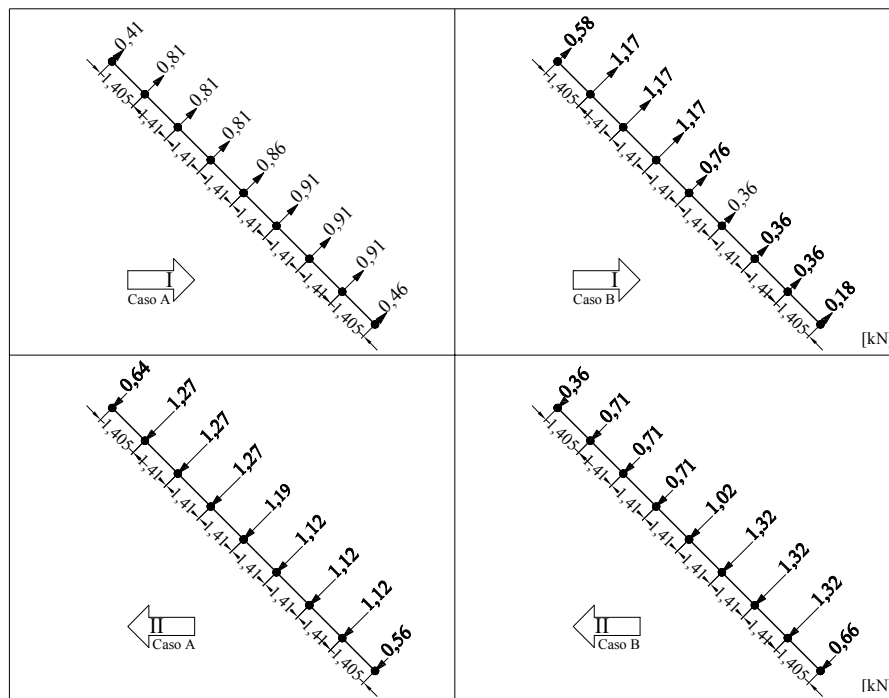
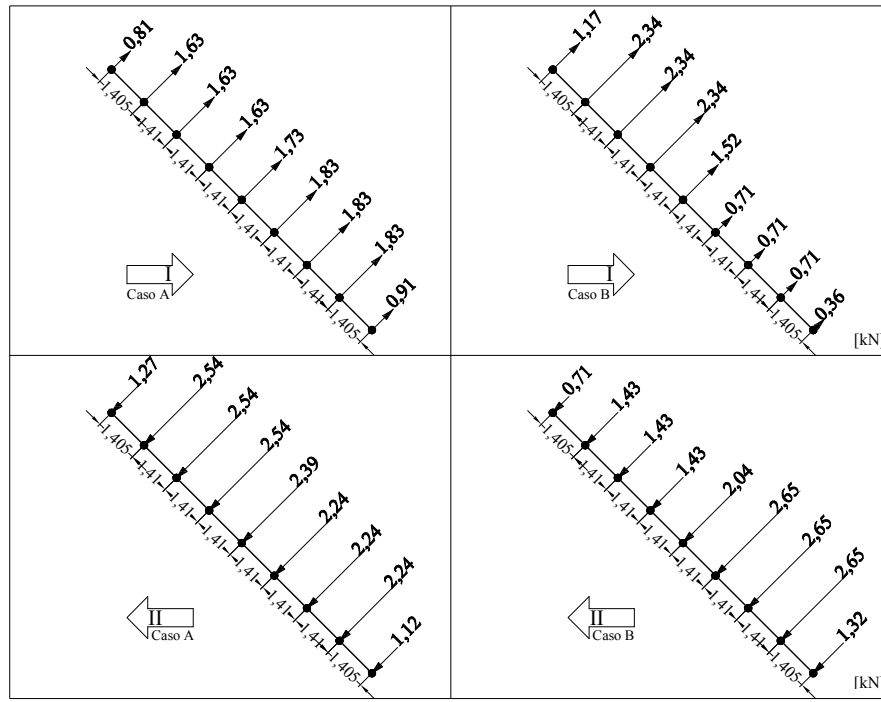


Figura 4.22: Diagramas de pressão nos painéis fotovoltaicos.

A partir dos valores da pressão obtidos e das áreas de referência A_i , apresentadas na Figura 4.21, calcularam-se os valores das forças F_i nos nós i dos perfis C e OM, indicadas nas Figuras 4.23(a) e (b), respectivamente. Às forças F_i correspondentes aos sentidos I e II do vento e aos casos A e B de distribuição de pressão propostos na norma ASCE foi dada a designação de $F_{I,a}$, $F_{I,b}$, $F_{II,a}$ e $F_{II,b}$.





(a) Forças pontuais $F_{I,a}$, $F_{I,b}$, $F_{II,a}$ e $F_{II,b}$ nos perfis OM.

Figura 4.23: Forças pontuais F_i sobre os perfis C e OM.

Para fazer um estudo comparativo entre a norma ASCE/SEI 7-10 e o Eurocódigo 1, em termos dos resultados relativos à força total do vento sobre os painéis fotovoltaicos, efectuou-se o cálculo desta admitindo a seguinte situação hipotética: o seguidor solar pode rodar em torno do seu eixo horizontal de um ângulo de inclinação θ compreendido entre 0° e 45° . Assim, para a gama de valores de $\theta \in [0^\circ, 30^\circ]$ relativamente aos quais são apresentados valores de c_p nas duas normas, obtiveram-se os valores da referida força, para os casos em que o vento, em relação à superfície dos painéis, tem sentido ascendente e descendente. Com esta determinação pretende-se averiguar se os dois documentos normativos conduzem a forças do vento sobre o seguidor muito distintas. Este estudo comparativo é apresentado em Anexo C. Do estudo realizado, concluiu-se que, para ângulos θ compreendidos entre 0° e 30° , não há consenso entre as normas no que se refere à definição da acção do vento em estruturas do tipo *coberturas isoladas de uma vertente* e, consequentemente, em estruturas do tipo seguidor solar.

4.4.2 Determinação da força do vento variável no tempo

Neste parágrafo apresenta-se um método alternativo para quantificar a acção do vento, não se pretendendo, contudo, invalidar o anteriormente apresentado. Segundo este método, que

permite obter a força dinâmica do vento a partir da velocidade do vento, a força $F_i(t)$ no nó i de um perfil C ou OM, situado à altura z_i , é obtida a partir da relação

$$F_i(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_i \cdot c_p \cdot [\bar{v}(z_i)^2 + 2 \cdot \bar{v}(z_i) \cdot \tilde{v}(t) + \tilde{v}(t)^2] \quad (4.2)$$

O cálculo de $\bar{v}(z_i)$ foi efectuado com base no perfil vertical da velocidade média preconizado pela norma ASCE e traduzido na equação 3.14. Na Figura 4.24 mostram-se os valores da velocidade média do vento para as diferentes alturas z_i compreendidas entre 0,8 m e 8,6 m, espaçadas entre si de 0,975 m. Adicionalmente, a fim de verificar se a norma EC1 conduziria a resultados diferentes, caso pudesse ter sido utilizada, apresentam-se na mesma figura os valores de $\bar{v}(z_i)$ obtidos a partir da equação C.4 adoptada em EC1.

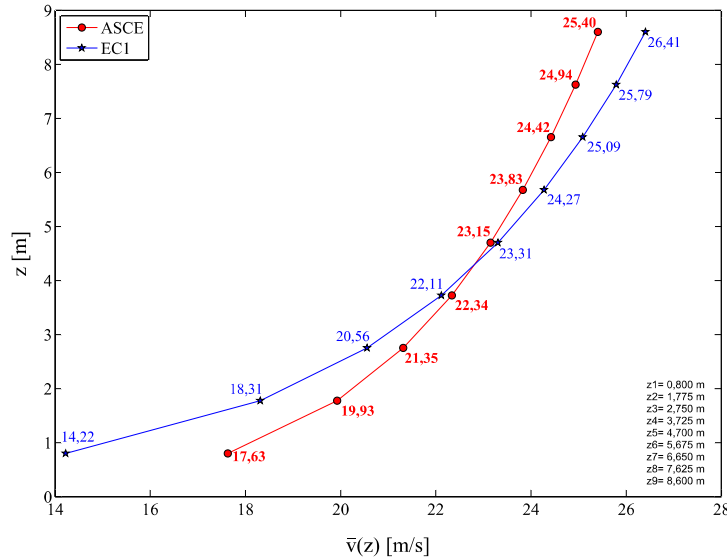


Figura 4.24: Velocidade média do vento a diferentes alturas z_i , segundo as normas ASCE e EC1.

A seguir apresenta-se o procedimento que foi adoptado para simular numericamente a velocidade flutuante do vento com vista a obter a velocidade deste.

4.4.2.1 Simulação numérica da velocidade flutuante do vento

Para simular numericamente a parcela flutuante da velocidade do vento, $\tilde{v}(t)$, considerou-se os dois casos de aplicação do método WAWS: o caso em que se admite a existência de total correlação espacial das séries temporais de $\tilde{v}(t)$, na superfície dos painéis fotovoltaicos, e o caso em que se considera a possibilidade de não existência da referida correlação total.

▷ Simulação numérica da componente flutuante da velocidade do vento admitindo a total correlação entre séries temporais

Neste caso, a simulação de $\tilde{v}(z, t)$ foi efectuada com base na equação 2.31 proposta por Shinozuka, que aqui se reproduz.

$$\tilde{v}(z, t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot S_v(z, f_n) \cdot \Delta f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \phi_n)$$

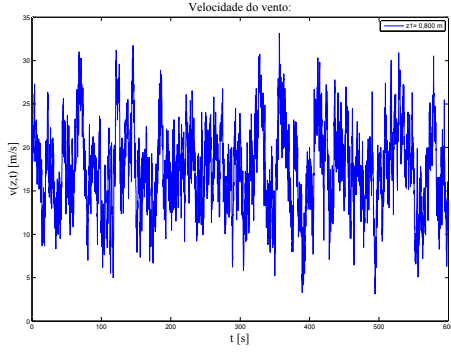
O significado das grandezas é o que se refere em §2.2.3.1.

A obtenção das séries temporais de $\tilde{v}(z, t)$ foi efectuada com recurso ao espectro de potência que consta na norma ASCE (equação 3.12). A escolha deste espectro, em vez do de Davenport ou do de Kaimal, muito referenciados na literatura, deve-se ao facto do estudo efectuada nesta dissertação, sobre a acção do vento no seguidor solar, estar assente no uso desta norma.

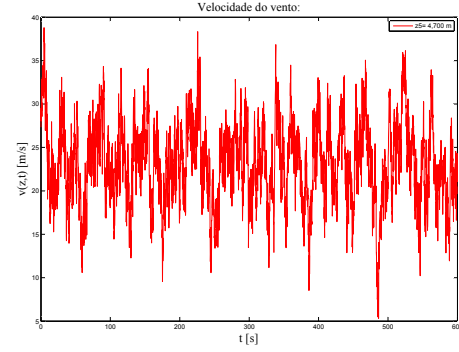
Para simular a velocidade flutuante do vento desenvolveu-se uma rotina computacional no programa Matlab, apresentada em §D.1 do Anexo D, que, para diferentes ângulos de fase aleatórios, ϕ_i , no intervalo $[0, 2\pi]$ rad, permite determinar $\tilde{v}(z_i, t)$ para diferentes alturas z_i dos nós i . Na rotina desenvolvida introduziu-se, adicionalmente, o perfil da velocidade média $\bar{v}(z_i)$ de modo a poder obter a velocidade do vento, $v(z_i, t)$. Esta determinação foi efectuada para os valores z_i que se mostram na Figura 4.24. O uso da equação acima indicada, levou a uma discretização do espectro de potência do vento no domínio de frequências considerado. Este domínio foi escolhido de forma a que nele estivessem incluídas as frequências próprias de vibração da estrutura. Estas frequências, já referidas, estão compreendidas entre 1,30 Hz e 6,66 Hz. Para o domínio da frequência considerou-se $f_n \in [0,01; 7,00]$ Hz.

A discretização do domínio de frequências foi efectuada no modo a seguir indicado: o número N de frequências f_n , $i = 1, \dots, N$, ou, de um modo equivalente, o intervalo de frequência Δf adoptado é tal que $N = 2^m$ ($m = 12$) [46]. O valor deste intervalo deve satisfazer a relação $2^m = \frac{f_N - f_1}{\Delta f} + 1$. As séries temporais foram obtidas para um período T de 600 s (10 min) e um intervalo de tempo $\Delta t = \frac{T}{2^m - 1}$.

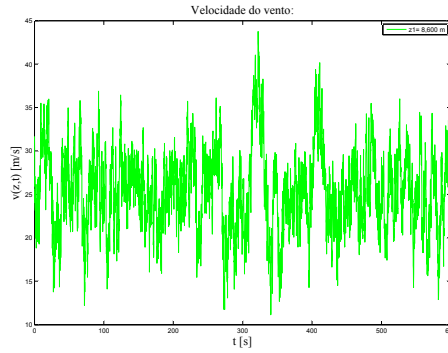
Após o processamento do programa Matlab obtiveram-se os registos da velocidade do vento para cada altura z_i considerada. Na Figura 4.25 apenas se mostram três séries temporais, correspondentes às alturas $z_1 = 0,8$ m, $z_5 = 4,7$ m e $z_9 = 8,6$ m.



(a) $z_1 = 0,8$ m.



(b) $z_5 = 4,7$ m.



(c) $z_9 = 8,6$ m.

Figura 4.25: Séries temporais de $v(z_i, t)$ para as alturas z_1 , z_5 e z_9 consideradas.

Tendo em consideração que as séries temporais associadas a $\tilde{v}(z_i, t)$ não diferem muito entre si, entre as alturas z_1 e z_9 , considera-se, de uma forma simplificada, que a força $F_i(z, t)$ em cada nó i pode ser calculada a partir do valor de $v(z_5, t)$ correspondente à altura média do seguidor, $z_5 = 4,7$ m. Assim, procurou-se analisar as séries temporais a esta altura.

Para determinar a contribuição da velocidade flutuante no cálculo da força $F(z_5, t)$ observaram-se cem séries temporais de $\tilde{v}(z_5, t)$ das quais foram escolhidas seis séries (Figuras 4.26(a)-(f)). Para efectuar a selecção das seis séries temporais procedeu-se do seguinte modo: para cada uma das cem séries anotou-se a amplitude máxima de $\tilde{v}(t)$. A partir dos valores assim obtidos construiu-se um histograma representado na Figura D.1 do Anexo D, o qual traduz o número de séries cujos valores máximos estão situados nos intervalos de velocidade considerados. Da observação do referido histograma pode inferir-se que, maioritariamente, a amplitude da velocidade flutuante está situada no intervalo $[14, 15]$ m/s. Tendo em consideração este facto as seis séries a considerar foram aleatoriamente seleccionadas entre as séries cuja amplitude

Capítulo 4. Análise e Modelação do Seguidor Solar

máxima se situa neste intervalo. É de referir que a velocidade $v(t)$ é considerada na literatura como um processo ergódico. Isto significa que qualquer uma das séries temporais obtidas à altura média do seguidor é representativa de $\tilde{v}(z, t)$ a esta altura.

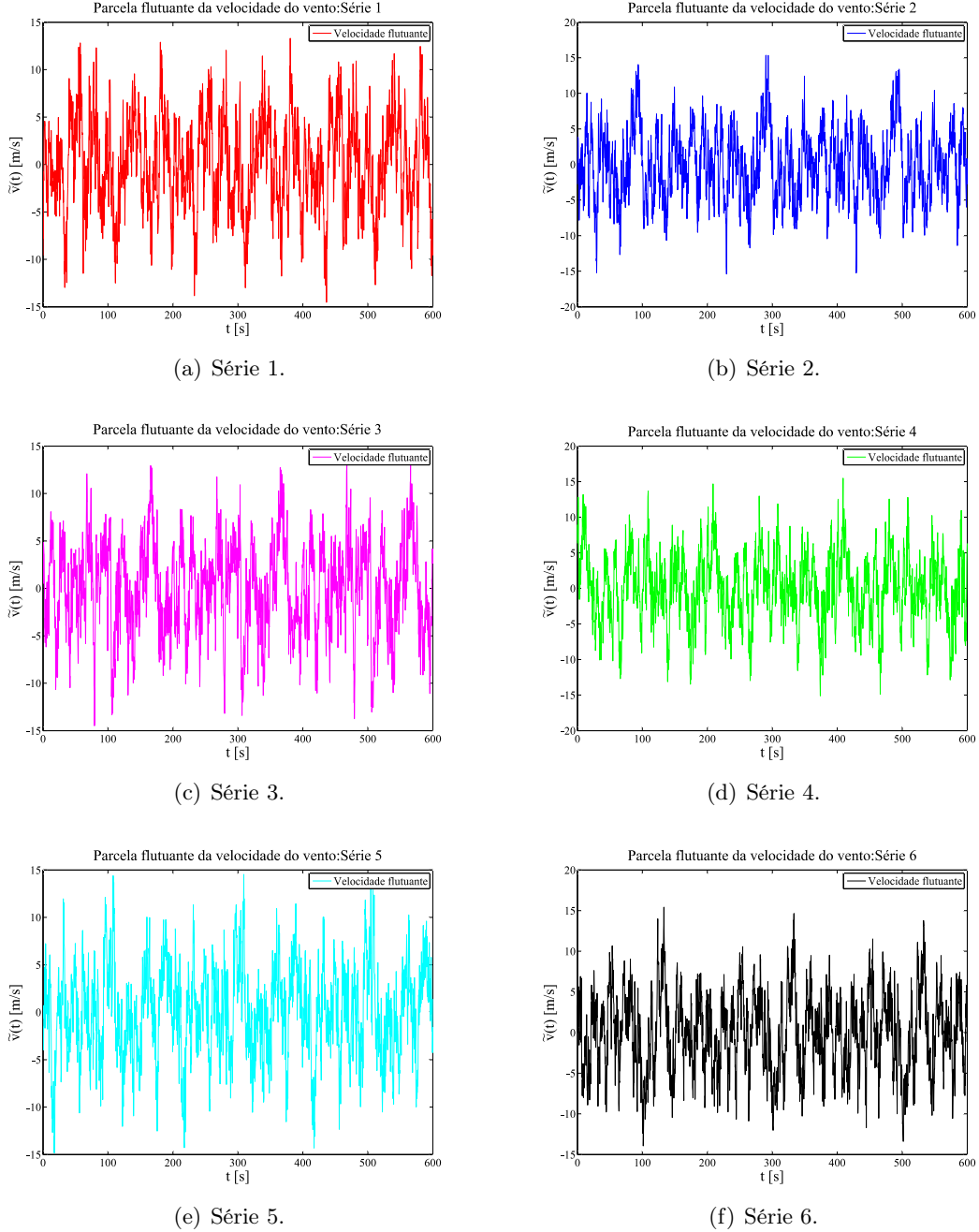


Figura 4.26: Séries temporais de $\tilde{v}(z_5, t)$.

Ao admitir a total correlação da velocidade flutuante em todos os pontos da superfície dos painéis fotovoltaicos e, consequentemente, da pressão nestes, poderá ser-se levado a uma hipótese

demasiado conservativa. Efectivamente, como a área da superfície dos painéis fotovoltaicos é relativamente grande, 145,6 m², pode não se observar a correlação atrás referida. Assim, procurou-se também definir a velocidade flutuante do vento admitindo a possível falta de total correlação entre as séries temporais nos diferentes nós i dos perfis C e OM em que é feita a determinação de $F_i(t)$. Com este objectivo utilizou-se o método WAWS para a situação de correlação citada. No uso deste método optou-se pelo processo POD de decomposição da matriz de densidade espectral de potência cruzada, $S(f)$. Para gerar os novos registos da componente flutuante da velocidade do vento desenvolveu-se outra rotina em Matlab que contempla, adicionalmente, a possível falta de correlação espacial entre séries temporais. Esta rotina é apresentada em §D.1.2 do Anexo D.

▷ **Simulação da velocidade flutuante do vento considerando a possível falta de total correlação entre séries temporais. Decomposição POD.**

A simulação numérica da velocidade flutuante do vento, $\tilde{v}(t)$, pressupondo a possibilidade de não existência da total correlação espacial deste processo, foi efectuada com base na equação 2.45 que a seguir se transcreve.

$$\tilde{v}(t) = 2 \cdot \sqrt{\Delta f} \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \psi_j(f_n) \cdot \sqrt{\lambda_j(f_n)} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \phi_n)$$

Esta equação deriva da aplicação conjunta do método WAWS para a situação de correlação indicada e da decomposição POD da matriz de densidade espectral de potência cruzada. O significado das grandezas nela existentes foi dado em §2.2.3.1.

Para a determinação de $\tilde{v}(t)$, de acordo com o método indicado, definiu-se a matriz de densidade espectral de potência cruzada, $S(f)$, cujos elementos são obtidos a partir das equações 2.33 e 2.34. Na obtenção destes elementos usou-se a função de densidade espectral $S_v(z, f)$ proposta pela ASCE (equação 3.12) e a função de coerência de Davenport (equação 2.30). Na primeira função intervêm a escala de turbulência do vento, $L_v(z)$, que, segundo a norma ASCE, só contabiliza o tamanho dos turbilhões num plano vertical (y-z) perpendicular à direcção x do vento. Assim, a função de coerência deve ser definida para pontos situados neste plano. Perante este facto, só é possível obter as séries temporais para pontos deste plano. Por conseguinte, a determinação de $\tilde{v}(t)$ foi feita para os cento e vinte seis pontos, de coordenadas (y,z), figurados no plano y-z indicado a vermelho na Figura 4.27.

A fim de obter $\tilde{v}(t)$ desenvolveu-se uma nova rotina em Matlab em que se considerou a mesma discretização do domínio da frequência usada na primeira rotina desenvolvida para $\tilde{v}(t)$, relativa ao caso em que se admitiu total correlação das séries temporais, *i.e.*, $N = 2^{12} =$

4096 pontos. A matriz de densidade espectral de potência cruzada, $S(f)$, para cada f_n ($n=1, \dots, 4096$), tem dimensão 126×126 .

Os elementos da matriz dos vectores próprios e da dos valores próprios, da equação 2.45, respectivamente $\psi_j(f_n)$ e $\lambda_j(f_n)$, foram obtidos por decomposição POD da matriz $S(f)$, recorrendo ao comando do Matlab $eig()$ ⁵.

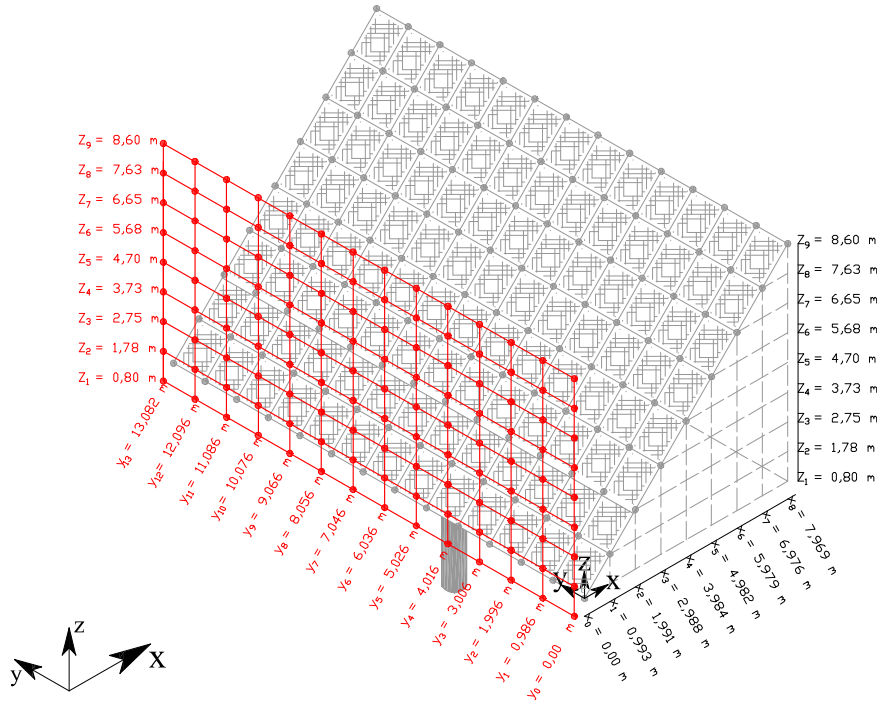


Figura 4.27: Coordenadas dos cento e vinte seis pontos a considerar para efeitos da simulação da velocidade flutuante do vento.

O processamento da rotina desenvolvida para obtenção das séries temporais, devido ao volume de cálculos envolvidos, levou aproximadamente entre quatro a cinco dias. Assim, dever-se-ia ter implementado o algoritmo FFT para obter uma maior eficiência computacional.

As séries simuladas para as diferentes alturas são muito similares, pelo que parece indiciar a existência de correlação espacial de $\tilde{v}(t)$ em toda a superfície dos painéis. Contudo, só mediante um tratamento estatístico adequado, que não foi realizado, se pode inferir sobre a existência ou não de correlação espacial.

Na Figura 4.28 mostra-se o registo, obtido com base na rotina atrás citada, da velocidade flutuante do vento relativa ao nó de coordenadas $z = 4,700$ m e $y = 6,541$ m, indicado na

⁵Através do comando $eig()$ do programa Matlab, é possível determinar os vectores próprios, V , e valores próprios, D , da matriz A , da seguinte forma: $[V, D] = eig(A)$.

Figura 4.27. Para fins comparativos é apresentada, na mesma figura, o registo da velocidade $\tilde{v}(t)$ para $z=4,700$ m, no caso em que se admite total correlação espacial.

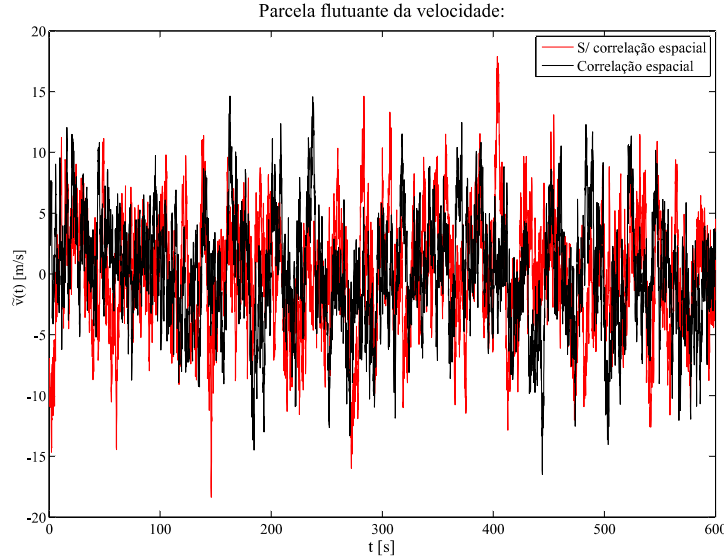


Figura 4.28: Velocidade flutuante do vento à altura $z=4,7$ m nos casos de total correlação espacial e de possível ausência desta.

No presente estudo não se efectuou a determinação da acção do vento no seguidor solar com base na simulação numérica da velocidade flutuante realizada com base no método WAWS e decomposição POD. Todavia, a realização desta simulação constitui um trabalho exploratório de interesse futuro.

► Forças do vento, $F_i(t)$, nos nós i dos perfis C e OM

Por conveniência de cálculo e, por se tornar mais simplificado o processo de introdução das cargas de vento no programa SAP2000, a força do vento $F_i(t)$, definida pela equação 4.2, foi decomposta em três componentes, $\bar{F}_i(z)$, $\tilde{F}_i(t)$, e $\check{F}_i(t)$, dadas pelas equações 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Estas componentes são calculadas para $z=4,7$ m.

$$\bar{F}_i = \underbrace{\left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_i \cdot c_p \cdot \bar{v}(z)^2 \right]}_{\text{constante}} = k_1 \quad (4.3)$$

$$\tilde{F}_i(t) = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_i \cdot c_p \cdot 2 \cdot \bar{v}(z) \right] \cdot \tilde{v}(t) = \underbrace{\left[\rho \cdot A_i \cdot c_p \cdot \bar{v}(z) \right]}_{\text{constante}} \cdot \tilde{v}(t) = k_2 \cdot \tilde{v}(t) \quad (4.4)$$

$$\check{F}_i(t) = \underbrace{\left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_i \cdot c_p\right]}_{\text{constante}} \cdot \tilde{v}^2(t) = k_3 \cdot \tilde{v}^2(t) \quad (4.5)$$

As componentes $\tilde{F}_i(t)$ e $\check{F}_i(t)$ foram escritas em termos de uma parcela constante, k_2 e k_3 , respectivamente, associadas à componente flutuante da velocidade, $\tilde{v}(t)$. Como estas constantes dependem dos coeficientes de pressão, c_p , definidos pela norma ASCE, analisaram-se as quatro situações seguintes: sentidos do vento I e II e casos A e B (cf. Figura 3.14). Designam-se de $F_{I,A}$, $F_{I,B}$, $F_{II,A}$ e $F_{II,B}$ as forças dadas pelas relações abaixo indicadas.

$$\begin{aligned} F_{I,A} &= k_{1,(I,A)} + k_{2,(I,A)} \cdot \tilde{v}(t) + k_{3,(I,A)} \cdot \tilde{v}^2(t) \\ F_{I,B} &= k_{1,(I,B)} + k_{2,(I,B)} \cdot \tilde{v}(t) + k_{3,(I,B)} \cdot \tilde{v}^2(t) \\ F_{II,A} &= k_{1,(II,A)} + k_{2,(II,A)} \cdot \tilde{v}(t) + k_{3,(II,A)} \cdot \tilde{v}^2(t) \\ F_{II,B} &= k_{1,(II,B)} + k_{2,(II,B)} \cdot \tilde{v}(t) + k_{3,(II,B)} \cdot \tilde{v}^2(t) \end{aligned}$$

Nestas expressões, fez-se a distinção entre as constantes k_1 , k_2 e k_3 , de acordo com as condições (sentido I e II, casos A e B) associadas aos valores de c_p .

Para os coeficientes de pressão correspondentes aos sentidos I e II, casos A e B, e áreas de influência A_i dos nós i dos perfis C e OM, apresentam-se, respectivamente, nas Tabelas 4.6 e 4.7 os valores de k_1 , k_2 e k_3 . Estes valores são relativos ao conjunto de nós dispostos segundo as “fileiras” f.1 a f.9 apresentadas nas Figuras E.1 e E.2.

Tabela 4.6: Valor das constantes k_1 , k_2 e k_3 associadas às componentes \bar{F}_i , $\tilde{F}_i(t)$, e $\check{F}_i(t)$ da força do vento nos nós i dos perfis C.

	Sentido I, Caso A			Sentido I, Caso B			Sentido II, Caso A			Sentido II, Caso B		
Nós	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
f.9	-0,190	-0,016	-0,0004	-0,273	-0,024	-0,0005	0,297	0,026	0,0005	0,166	0,014	0,0003
f.8	-0,380	-0,033	-0,0007	-0,547	-0,047	-0,0010	0,594	0,051	0,0011	0,333	0,029	0,0006
f.7	-0,380	-0,033	-0,0007	-0,547	-0,047	-0,0010	0,594	0,051	0,0011	0,333	0,029	0,0006
f.6	-0,380	-0,033	-0,0007	-0,547	-0,047	-0,0010	0,594	0,051	0,0011	0,333	0,029	0,0006
f.5	-0,404	-0,035	-0,0007	-0,357	-0,031	-0,0007	0,559	0,048	0,0010	0,475	0,041	0,0009
f.4	-0,428	-0,037	-0,0008	-0,166	-0,014	-0,0003	0,523	0,045	0,0010	0,618	0,053	0,0011
f.3	-0,428	-0,037	-0,0008	-0,166	-0,014	-0,0003	0,523	0,045	0,0010	0,618	0,053	0,0011
f.2	-0,428	-0,037	-0,0008	-0,166	-0,014	-0,0003	0,523	0,045	0,0010	0,618	0,053	0,0011
f.1	-0,214	-0,018	-0,0004	-0,083	-0,007	-0,0002	0,261	0,022	0,0005	0,309	0,027	0,0006

Tabela 4.7: Valor das constantes k_1 , k_2 e k_3 associadas às componentes \bar{F}_i , $\tilde{F}_i(t)$, e $\check{F}_i(t)$ da força do vento nos nós i dos perfis OM.

	Sentido I, Caso A			Sentido I, Caso B			Sentido II, Caso A			Sentido II, Caso B		
Nós	$k_{1,(I,A)}$	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
f.9	-0,380	-0,033	-0,0007	-0,547	-0,047	-0,0010	0,594	0,051	0,0011	0,333	0,029	0,0006
f.8	-0,761	-0,065	-0,004	-1,093	-0,094	-0,0020	1,188	0,102	0,0022	0,665	0,057	0,0012
f.7	-0,761	-0,065	-0,0014	-1,093	-0,094	-0,0020	1,188	0,102	0,0022	0,665	0,057	0,0012
f.6	-0,761	-0,065	-0,0014	-1,093	-0,094	-0,0020	1,188	0,102	0,0022	0,665	0,057	0,0012
f.5	-0,808	-0,069	-0,0015	-0,713	-0,061	-0,0013	1,117	0,096	0,0021	0,951	0,082	0,0018
f.4	-0,856	-0,073	-0,0016	-0,333	-0,029	-0,0006	1,046	0,090	0,0019	1,236	0,106	0,0023
f.3	-0,856	-0,073	-0,0016	-0,333	-0,029	-0,0006	1,046	0,090	0,0019	1,236	0,106	0,0023
f.2	-0,856	-0,073	-0,0016	-0,333	-0,029	-0,0006	1,046	0,090	0,0019	1,236	0,106	0,0023
f.1	-0,428	-0,037	-0,0008	-0,166	-0,014	-0,0003	0,523	0,045	0,0010	0,618	0,053	0,0011

No modelo estrutural implementado no SAP2000 foram “aplicadas” as constantes k_1 , k_2 e k_3 nos respectivos nós i dos perfis C e OM, como se se tratassem de forças estáticas, e foram associadas, às duas últimas constantes, as séries temporais $\tilde{v}(t)$ e $\tilde{v}^2(t)$, respectivamente.

4.4.3 Combinação de acções

Relativamente à combinação de acções a considerar na verificação aos Estados Limites Últimos e de Utilização foi necessário fazer algumas considerações.

O Eurocódigo 0 - *Bases para o projecto de estruturas (EC0)* estabelece que na verificação da estrutura aos Estados Limites Últimos deve ser adoptada uma combinação de acções tal que, as acções permanentes, G_j , e variáveis, Q_k , são majoradas pelos coeficientes parciais de segurança γ_G e γ_Q , respectivamente, do modo a seguir indicado [61].

$$\sum \gamma_{G_j, sup} \cdot G_j + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \cdot \sum G_j + 1,50 \cdot Q_k$$

$$\sum \gamma_{G_j, inf} \cdot G_j + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,00 \cdot \sum G_j + 1,50 \cdot Q_k$$

Relativamente aos Estados Limites de Utilização, o Eurocódigo 0 estabelece que as acções permanentes, G_j , e variável, Q , quando combinadas, são multiplicadas por coeficientes parciais de segurança unitários, ou seja, a referida combinação deve ser traduzida por

$$\sum G_j + Q_k$$

No EC0, os coeficientes parciais de segurança que majoram as acções variáveis, γ_Q , são definidos com base nos valores característicos das acções. Segundo a cláusula 4.1.2(7) do EC0, o valor característico das acções climáticas, como o vento, “baseia-se na probabilidade de 0,02 de ser excedida a sua parte variável no tempo durante um período de retorno de um ano. Tal é equivalente, para a parte variável no tempo, a um período médio de retorno de 50 anos” [61]. A majoração da acção do vento pelo coeficiente parcial de segurança γ_Q estaria correcta se esta acção fosse determinada através do Eurocódigo 1.

Capítulo 4. Análise e Modelação do Seguidor Solar

Segundo a norma ASCE/SEI 7-10, a acção do vento, ao contrário do que sucede no EC1, é definida com base em valores nominais correspondentes a valores extremos anuais. Os parâmetros climatéricos, nomeadamente a velocidade de rajada, correspondem a valores com uma probabilidade de serem excedidos de aproximadamente 15% em 50 anos (probabilidade anual de ser excedidos de 0,00333) [62]. Para acções variáveis definidas com recurso à norma americana ASCE/SEI 7-10, o capítulo 2 desta norma recomenda a utilização das combinações de acções abaixo indicadas.

$$1,20 \cdot \sum G_j + 1,00 \cdot Q_k$$

$$0,90 \cdot \sum G_j + 1,00 \cdot Q_k$$

Analizando a combinação de acções proposta pela norma americana constata-se que as acções variáveis, Q_k , não são majoradas (são multiplicadas por um factor de segurança unitário). Depreende-se que a norma americana ASCE prevê valores extremos climatéricos e, como tal, não majora o valor das acções variáveis.

Nesta dissertação, a acção variável, ou seja, a acção do vento, foi determinada segundo a norma ASCE. Para ser congruente com os critérios desta norma, a acção do vento não foi majorada, ou seja, admitiu-se um coeficiente parcial de segurança unitário. No entanto, como a verificação de segurança da estrutura metálica do seguidor solar aos Estados Limites Últimos foi realizada recorrendo ao Eurocódigo 3, achou-se conveniente considerar os factores de majoração das acções permanentes, γ_{Gj} , sugeridos pelo EC0.

Na análise do seguidor solar, as acções permanentes G_j correspondem à soma do peso próprio da estrutura, PP_{est} e dos painéis fotovoltaicos, $P_{paineis}$. A acção variável do vento, Q , na presente dissertação, foi definida de duas formas distintas: pressão estatática definida pela norma ASCE (cf. §4.4.1) e força variável no tempo obtida por simulação numérica (cf. §4.4.2).

Para a verificação da segurança do seguidor solar aos Estados Limites Últimos as quatro combinações de acções consideradas são

ASCE	Combinação [S,A] = $1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,a}$
	Combinação [S,B] = $1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,b}$
	Combinação [P,A] = $1,35 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,a}$
	Combinação [P,B] = $1,35 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,b}$
Séries	Combinação [S,A] = $1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,A}$
	Combinação [S,B] = $1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,B}$
	Combinação [P,A] = $1,35 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,A}$
	Combinação [P,B] = $1,35 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,B}$

Na verificação do seguidor solar aos Estados Limites de Utilização admitiu-se as combinações de acções

ASCE	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{S}, \mathbf{A}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,a}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{S}, \mathbf{B}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,b}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{P}, \mathbf{A}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,a}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{P}, \mathbf{B}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,b}$
Séries	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{S}, \mathbf{A}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,A}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{S}, \mathbf{B}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{I,B}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{P}, \mathbf{A}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,A}$
	Combinação $\mathbf{d}[\mathbf{P}, \mathbf{B}] = 1,00 \cdot (PP_{est} + PP_{paineis}) + 1,00 \cdot F_{II,B}$

Para o modelo estrutural proposto em §4.3 e para as acções do vento definidas em §4.4.1 e §4.4.2, com o intuito de determinar os esforços e os deslocamentos da estrutura, foram realizados no programa de cálculo automático SAP2000[®], respectivamente, dois tipos de análise: uma análise estática linear e uma análise dinâmica no domínio do tempo (*time-history analysis*) pelo método de sobreposição modal. O programa de elementos finitos SAP2000[®], respeitando as relações geométricas e constitutivas do material atribuído aos diferentes elementos do modelo estrutural, permite resolver, para o conjunto de acções estática e dinâmicas consideradas, as respectivas equações de equilíbrio estático e dinâmico e assim obter os resultados pretendidos.

Capítulo 5

Resultados

Uma estrutura deve ser dimensionada e concebida de forma a desempenhar, com eficácia, as funções a que se destina, durante um período de vida útil pré-estabelecido. Para isso devem ser verificadas as condições que impeçam o seu colapso estrutural, segurança aos Estados Limites Últimos, e que assegurem um adequado desempenho em serviço, segurança aos Estados Limites de Utilização [60].

Na presente dissertação, relativamente à acção do vento, é analisada a segurança da estrutura do seguidor solar em relação aos Estados Limites Últimos (verificação da segurança das secções transversais, da coluna grande à encurvadura e das ligações aparafusadas) e, em relação aos Estados Limites de Utilização, são verificadas as deformações e deslocamentos da estrutura que possam afectar a sua conveniente utilização. Quanto à verificação relativamente a estes últimos, não existe nenhum documento normativo que regule o tipo de estruturas em análise e estabeleça valores limites de deformação.

A fim de estimar os efeitos da acção do vento sobre o seguidor solar e compreender os potenciais problemas estruturais adversos dela resultantes, recorreu-se a uma análise global elástica de primeira ordem para obter os esforços finais na estrutura, os deslocamentos nodais e a configuração deformada da estrutura.

- Ao adoptar uma análise global elástica admitiu-se que a relação tensão-deformação do aço estrutural é linear, ou seja, que a sua deformação é proporcional à tensão actuante, independentemente do valor desta. Nesta análise, para efeitos de verificação aos Estados Limites Últimos, tendo em conta o comportamento do aço maciço corrente, pressupõe-se que a tensão provocada pelos esforços actuantes, nas secções dos diferentes componentes estruturais do seguidor, seja inferior à tensão de cedência do aço.

- Na análise de primeira ordem, os esforços e deslocamentos são obtidos a partir da geometria inicial indeformada da estrutura.

Em §5.1 mostram-se os resultados obtidos através das análises estática e dinâmica realizadas no programa SAP2000[®], ou seja, os esforços internos nos diferentes elementos estruturais, os deslocamentos nodais e a deformação global da estrutura; em §5.2 são apresentadas as devidas verificações de segurança. No §5.3 é feita a análise e discussão de alguns dos resultados obtidos.

5.1 Resultados obtidos através das análises estática e dinâmica

5.1.1 Esforços internos nos elementos estruturais

Neste parágrafo figuram os resultados obtidos em termos dos esforços internos máximos verificados nos diferentes elementos estruturais: perfis C e OM, vigas V1, V2 e V3, tubos facar, colunas grande e pequena. Não são apresentados os esforços obtidos nos perfis U e TC uma vez que estes são pouco significativos, visto que têm uma grandeza muito inferior aos valores de cálculo da resistência das secções dos referidos perfis. Em relação aos perfis L, ao correr o modelo no programa SAP2000[®], verificou-se que, para as análises estática e dinâmica, os esforços nestes elementos eram pouco significativos. Este resultado deve-se às restrições que foram impostas aos elementos *Link2* e *Link3*, que materializam a ligação L_1 , e ao facto dos perfis L estarem intercalados por elementos de elevada rigidez.

Nas Tabelas 5.1-5.8 apresentam-se, para cada um dos elementos estruturais indicados e para as quatro combinações de acções [S,A], [S,B], [P,A] e [P,B], os esforços de dimensionamento máximos instalados e a respectiva secção onde ocorrem. Na apresentação dos resultados nas referidas tabelas, usou-se respectivamente a sigla “ASCE” e “Séries” para fazer a distinção entre os que foram obtidos recorrendo à norma americana ASCE/SEI 7-10 e os que provieram da consideração de forças do vento variáveis no tempo em cujo cálculo intervieram as séries temporais associadas ao processo $\tilde{v}(t)$.

Na análise dinâmica do seguidor foram ensaiadas seis séries temporais distintas indicadas na Figura 4.26 do §4.4.2.1. Estas séries, pelo seu carácter aleatório, apresentam algumas discrepâncias entre si, conduzindo, como seria expectável, a resultados diferentes. Como no presente estudo se tem em vista analisar a segurança do seguidor, perante a acção do vento, optou-se por considerar, para valores dos esforços obtidos com base nas séries temporais, os que

5.1. Resultados obtidos através das análises estática e dinâmica

resultaram do ensaio da série temporal que, entre as seis séries estatisticamente seleccionadas, conduziu aos esforços máximos na estrutura.

A nomenclatura utilizada para identificar os diferentes esforços de dimensionamento é a seguinte: N_{Ed} representa o esforço axial de tracção ou compressão, $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ os momentos flectores em relação aos eixos de maior e de menor inércia, respectivamente, e $V_{z,Ed}$, $V_{y,Ed}$ o esforço transversal segundo os eixos z-z e y-y, respectivamente, e T_{Ed} o momento torsor.

Perante a configuração do seguidor solar e a distribuição das pressões do vento sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos, são iguais entre si os esforços em cada um dos seguintes pares de elementos estruturais: as duas vigas V3; perfis C_1 e C_2 ; OM_1 e OM_{12} , OM_2 e OM_{11} e assim, sucessivamente para os restantes perfis OM. Em relação às vigas V1 e V2 e TF, os esforços N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ são simétricos em relação ao meio do comprimento destes elementos estruturais e, em relação a este, os esforços $V_{y,Ed}$ e $V_{z,Ed}$ são anti-simétricos.

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados nas tabelas seguintes deve ser consultado o Anexo F, onde são mostrados os diagramas de esforços dos diversos elementos estruturais. É de referir que, apesar de terem sido testados todos os casos de carga indicados em §4.4.3, no Anexo F só são apresentados de forma exaustiva os diagramas relativos à análise estática. Em relação à análise dinâmica, mostram-se apenas os diagramas que se julgam pertinentes para a análise do seguidor.

▷ Perfis C e OM

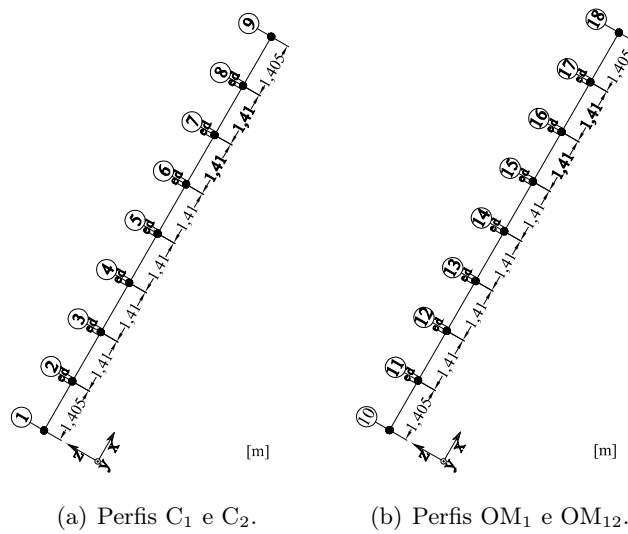


Figura 5.1: Nomenclatura atribuída aos nós dos dois perfis C e dos perfis OM_1 e OM_{12} .

Capítulo 5. Resultados

Tabela 5.5: Esforços internos máximos nas vigas V3.

V3	[S,A]			[S,B]			[P,A]			[P,B]		
	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries
N_{Ed} [kN]	H_e	22,29	16,23	H_e	20,50	15,57	J_d	-36,94	-27,45	J_d	-33,52	-25,49
$V_{z,Ed}$ [kN]	I_e	120,29	104,58	I_d	-163,82	-158,00	J_e	235,21	227,23	H_d	-246,66	-231,94
$M_{y,Ed}$ [kNm]	H	80,14	104,43	J	109,16	105,28	J	-156,76	-151,47	H	-164,40	-154,58
$V_{y,Ed}$ [kN]	G^4	8,90	9,09	G^4	8,90	9,31	K^5	12,04	12,18	K^5	12,03	12,03
$M_{z,Ed}$ [kNm]	G	12,26	12,52	G	12,25	12,82	K	-16,59	-16,78	K	-16,57	-16,57

⁴ O esforço axial é constante no troço de viga do ponto G a H. ⁵ O esforço axial é constante no troço de viga do ponto J a K.

▷ Tubos facar

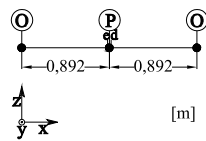


Figura 5.5: Nomenclatura atribuída aos nós dos tubos facar.

Tabela 5.6: Esforços internos máximos nos tubos facar.

TF	[S,A]			[S,B]			[P,A]			[P,B]		
	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries
$V_{z,Ed}$ [kN]	O	-72,33	-64,20	O	-61,77	-60,91	P_e	150,91	144,93	P_e	132,20	125,82
$M_{y,Ed}$ [kNm]	O	-31,95	-28,68	O	-27,24	-26,86	P	-66,90	-64,24	P	-58,12	-55,71
$V_{y,Ed}$ [kN]	P_e	-19,73	-20,91	P_e	-21,47	-21,47	P_e	-26,63	-28,22	P_e	-26,63	-27,59
$M_{z,Ed}$ [kNm]	P	8,48	9,00	P	8,48	9,25	P	11,45	12,15	P	11,45	11,87
T_{Ed} [kNm]	P_e	9,13	4,67	P_e	-123,85	-119,29	P_e	14,53	20,71	P_e	-96,12	-90,19

▷ Colunas grande e pequena

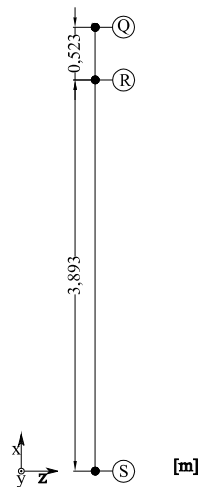


Figura 5.6: Nomenclatura atribuída aos nós das colunas grande e pequena.

5.1. Resultados obtidos através das análises estática e dinâmica

Tabela 5.7: Esforços internos máximos na coluna pequena.

CP	[S,A]			[S,B]			[P,A]			[P,B]		
	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries
N_{Ed} [kN]	Q	71,30	60,32	Q	56,37	51,61	R	-252,56	-241,45	R	-226,10	-215,63
$V_{z,Ed}$ [kN]	R ⁵	-127,10	-119,83	R ⁵	-112,16	-114,17	R ⁵	175,76	170,79	R ⁵	149,30	142,19
$M_{y,Ed}$ [kNm]	R	-48,24	-58,01	R	-306,38	-297,83	R	121,02	129,80	Q	-192,25	-180,38

⁵ O esforço $V_{y,Ed}$ é constante no troço compreendido entre os pontos R e Q da Figura 5.6.

Tabela 5.8: Esforços internos máximos na coluna grande.

CG	[S,A]			[S,B]			[P,A]			[P,B]		
	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries	Nó	ASCE	Séries
N_{Ed} [kN]	R	70,21	-61,00	R	55,27	51,61	S	-267,98	-256,88	S	-241,52	-231,06
$V_{z,Ed}$ [kN]	S ⁶	-127,10	-120,56	S ⁶	-112,16	-115,22	S ⁶	175,76	171,97	S ⁶	149,30	142,89
$M_{y,Ed}$ [kNm]	S	-554,3	-537,54	S	-753,00	-753,03	S	820,89	811,94	S	480,37	474,43

⁶ O esforço $V_{y,Ed}$ é constante no troço compreendido entre os pontos S e R da Figura 5.6.

Os resultados obtidos nas Tabelas 5.1-5.8 mostram que, para a análise do seguidor, é necessária a consideração das quatro distribuições de pressão do vento previstas na norma ASCE (sentidos I e II e casos A e B), na medida em que, cada uma delas, conduz a diferentes efeitos na estrutura. Efectivamente, verifica-se que os esforços $V_{z,Ed}$ e $M_{y,Ed}$ máximos nos perfis U e OM resultam da combinação [P,B]. Esta combinação conduz também aos máximos esforços transversos e momentos flectores, segundo as duas direcções, nas vigas V1 e V3. A combinação de acções [P,A], traduz-se, na viga V2 e tubos facar, em valores máximos dos esforços transversos e momentos flectores segundo as duas direcções. No entanto, em relação aos TF, o momento tursor máximo T_{Ed} resulta da combinação [S,B]. Esta combinação conduziu também ao valor máximo de $M_{y,Ed}$ na coluna pequena. Nesta coluna, os esforços máximos $V_{z,Ed}$ e $M_{y,Ed}$ são devidos, respectivamente, às combinações [P,A] e [P,B]. Na coluna grande, verifica-se que os esforços máximos resultam da combinação [P,A].

5.1.2 Deslocamentos nodais e deformação global da estrutura

Com base no modelo estrutural implementado no programa SAP2000[®] e nas análises estática e dinâmica efectuadas, para cada uma das combinações de acções d[S,A], d[S,B], d[P,A] e d[P,B], verificou-se a configuração deformada da estrutura do seguidor e determinaram-se os deslocamentos nos pontos nodais desta. Para cada uma das referidas combinações de acções, apresentam-se nas Figuras 5.7-5.10, a configuração deformada da estrutura, em relação à sua posição indeformada (indicada a cinzento).

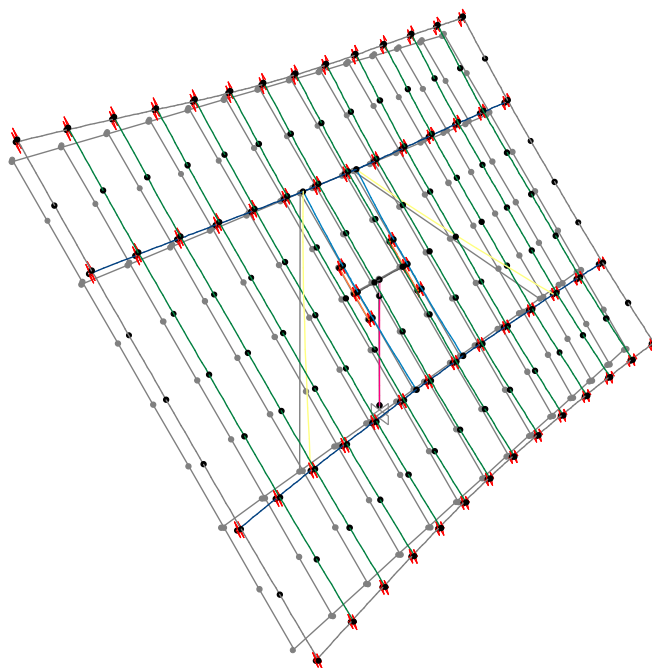


Figura 5.7: Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação $d[S,A]$.

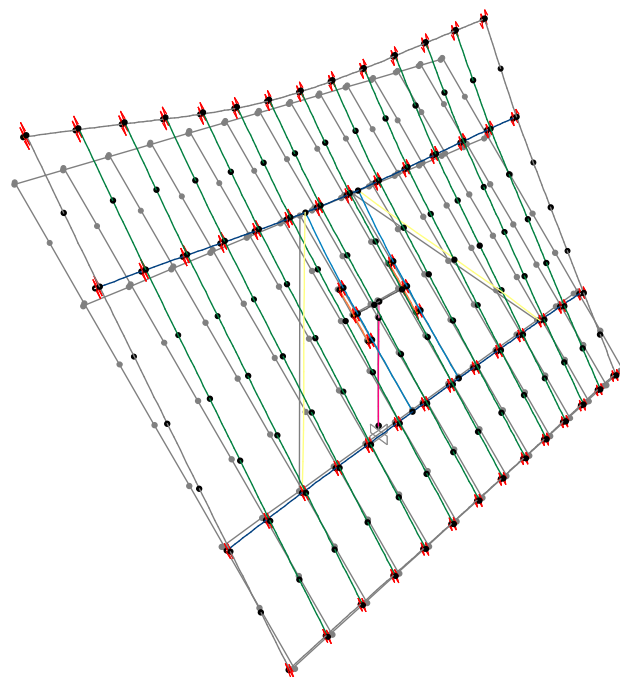


Figura 5.8: Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação $d[S,B]$.

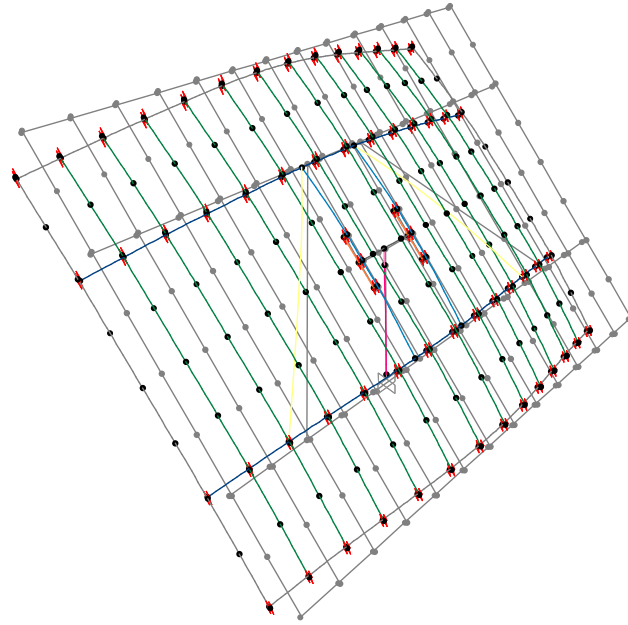


Figura 5.9: Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[P,A].

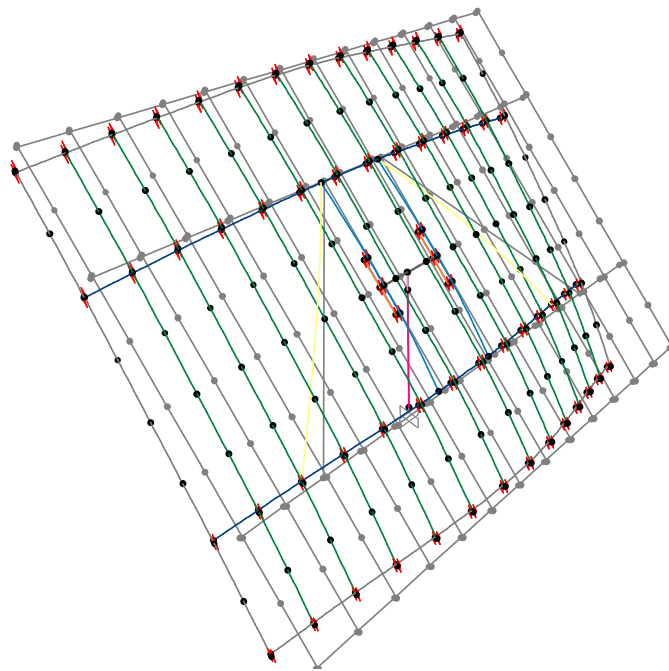


Figura 5.10: Deformação da estrutura do seguidor solar para a combinação d[P,B].

Na Figura 5.11 é apresentada a configuração deformada do grupo coluna e da cabeça do seguidor para as quatro combinações de acções indicadas. Para estas, o valor da flecha observada

no ponto Q da coluna pequena é apresentado na Tabela 5.9.

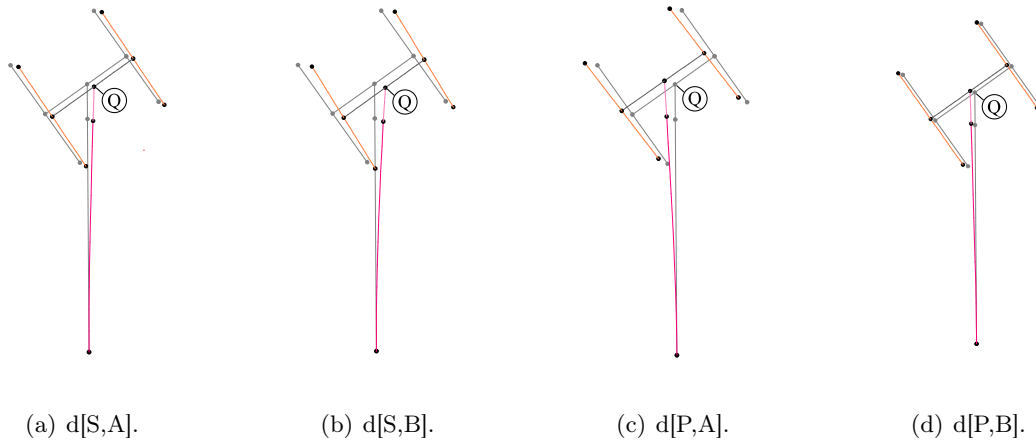


Figura 5.11: Configuração deformada do grupo coluna e cabeça do seguidor para as combinações de acções indicadas.

Tabela 5.9: Deslocamentos nodais [m] do ponto Q da coluna pequena.

Nó	ASCE				Séries			
	d[S,A]	d[S,B]	d[P,A]	d[P,B]	d[S,A]	d[S,B]	d[P,A]	d[P,B]
Q	-0,007	-0,011	0,011	0,005	-0,008	-0,012	0,012	0,006

Segundo a análise estática, a flecha máxima verificada no topo da coluna pequena (nó Q) é 0,011 m (11 mm) e, segundo a análise dinâmica, é 0,012 m (12 mm). Atendendo ao seu valor, estes deslocamentos não põem em causa a estabilidade global da estrutura. Todavia, tendo em vista a função para a qual o seguidor solar foi concebido, foram ainda analisados os deslocamentos e deformações que possam pôr em causa o bom funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Neste sentido, foram verificados os deslocamentos ao nível da malha metálica, nomeadamente os dos perfis C e OM em que assentam os painéis. Os deslocamentos nodais observados na malha metálica resultam, essencialmente, da deformação dos próprios perfis C e OM e das vigas V1, V2 e V3, assim como da restante estrutura que precede estas vigas, ou seja, da cabeça do seguidor e do grupo coluna.

Os deslocamentos nos sessenta e três nós da malha metálica a analisar, resultantes das análise estática e dinâmica, são apresentados na Tabela 5.10, para as quatro combinações de acções consideradas. Estes deslocamentos correspondem à distância na perpendicular entre os nós na configuração inicial e na configuração deformada. Considerou-se que os deslocamentos positivos correspondem à situação de “levantamento” da malha metálica e, consequentemente dos painéis fotovoltaicos, e os deslocamentos negativos traduzem um “abaixamento” da malha

5.1. Resultados obtidos através das análises estática e dinâmica

metálica. Além do deslocamento dos nós referido, cada nó apresenta uma translação de valor igual à flecha indicada, em consequência da curvatura do grupo coluna, que mobiliza toda a estrutura.

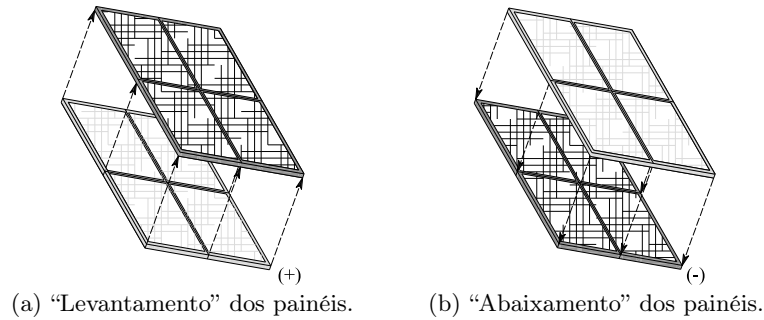


Figura 5.12: “Levantamento” e “abaixamento” dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 5.10: Deslocamentos nodais [m] da malha metálica (Perfis C e OM).

Nó	ASCE				Séries			
	d[S,A]	d[S,B]	d[P,A]	d[P,B]	d[S,A]	d[S,B]	d[P,A]	d[P,B]
1	0,203	-0,068	-0,335	-0,489	0,270	-0,159	-0,422	-0,558
2	0,187	-0,016	-0,317	-0,419	0,244	-0,106	-0,395	-0,481
3	0,174	0,037	-0,305	-0,357	0,225	0,096	-0,377	-0,414
4	0,169	0,091	-0,308	-0,312	0,216	0,144	-0,379	-0,369
5	0,167	0,146	-0,320	-0,274	0,212	0,195	-0,390	-0,332
6	0,166	0,202	-0,335	-0,240	0,208	0,245	-0,401	-0,297
7	0,168	0,263	-0,358	-0,212	0,206	0,302	-0,420	-0,266
8	0,176	0,334	-0,398	-0,194	0,214	0,374	-0,460	-0,248
9	0,188	0,409	-0,445	-0,181	0,228	0,453	-0,510	-0,236
10	0,170	-0,059	-0,286	-0,417	0,227	-0,133	-0,360	-0,476
11	0,154	-0,017	-0,263	-0,350	0,200	-0,088	-0,326	-0,400
12	0,141	0,028	-0,247	-0,291	0,180	0,074	-0,302	-0,334
13	0,139	0,075	-0,251	-0,253	0,172	0,113	-0,301	-0,293
14	0,139	0,122	-0,262	-0,224	0,169	0,154	-0,309	-0,263
15	0,137	0,168	-0,274	-0,196	0,166	0,197	-0,320	-0,235
16	0,138	0,219	-0,294	-0,173	0,167	0,248	-0,342	-0,214
17	0,148	0,282	-0,335	-0,163	0,180	0,316	-0,387	-0,207
18	0,162	0,352	-0,384	-0,158	0,198	0,393	-0,443	-0,207
19	0,138	-0,051	-0,235	-0,343	0,183	-0,106	-0,294	-0,391
20	0,121	-0,017	-0,209	-0,280	0,156	-0,069	-0,257	-0,318
21	0,109	0,019	-0,190	-0,226	0,136	0,053	-0,229	-0,256
22	0,108	0,058	-0,191	-0,194	0,129	0,082	-0,223	-0,218
23	0,108	0,096	-0,200	-0,171	0,126	0,114	-0,228	-0,193
24	0,108	0,133	-0,211	-0,150	0,125	0,149	-0,240	-0,174
25	0,109	0,175	-0,232	-0,134	0,129	0,195	-0,266	-0,163
26	0,121	0,231	-0,272	-0,131	0,146	0,259	-0,314	-0,167
27	0,136	0,293	-0,322	-0,134	0,167	0,332	-0,373	-0,176
28	0,106	-0,043	-0,182	-0,269	0,139	-0,080	-0,225	-0,304
29	0,090	0,017	-0,155	-0,212	0,114	-0,050	-0,188	-0,238
30	0,078	0,011	-0,136	-0,164	0,095	0,034	-0,160	-0,182
31	0,077	0,041	-0,136	-0,138	0,086	0,053	-0,152	-0,149
32	0,078	0,070	-0,144	-0,122	0,084	0,076	-0,156	-0,131
33	0,079	0,099	-0,154	-0,107	0,086	0,105	-0,167	-0,119
34	0,082	0,133	-0,172	-0,097	0,094	0,145	-0,193	-0,116
35	0,094	0,182	-0,211	-0,100	0,112	0,203	-0,241	-0,125
36	0,111	0,237	-0,259	-0,108	0,135	0,269	-0,299	-0,141

37	0,077	0,038	-0,132	-0,200	0,096	-0,059	-0,156	-0,220
38	0,062	-0,017	-0,106	-0,150	0,076	-0,037	-0,124	-0,164
39	0,051	-0,004	-0,088	-0,109	0,059	-0,020	-0,100	-0,117
40	0,050	0,026	-0,088	-0,090	0,051	0,029	-0,092	-0,091
41	0,052	0,048	-0,095	-0,080	0,050	0,046	-0,095	-0,079
42	0,053	0,069	-0,103	-0,070	0,054	0,068	-0,106	-0,073
43	0,057	0,096	-0,119	-0,065	0,063	0,101	-0,130	-0,074
44	0,070	0,138	-0,155	-0,070	0,081	0,151	-0,174	-0,086
45	0,087	0,186	-0,199	-0,081	0,103	0,208	-0,227	-0,102
46	0,054	-0,035	-0,090	-0,145	0,060	-0,048	-0,098	-0,152
47	0,039	-0,019	-0,065	-0,100	0,043	-0,028	-0,070	-0,103
48	0,030	-0,002	-0,051	-0,067	0,031	-0,012	-0,053	-0,067
49	0,031	0,017	-0,055	-0,056	0,029	0,017	-0,053	-0,053
50	0,035	0,033	-0,063	-0,052	0,030	0,029	-0,058	-0,047
51	0,036	0,048	-0,068	-0,045	0,033	0,044	-0,066	-0,043
52	0,038	0,067	-0,078	-0,039	0,040	0,068	-0,081	-0,042
53	0,050	0,103	-0,108	-0,045	0,055	0,108	-0,117	-0,051
54	0,068	0,146	-0,150	-0,057	0,075	0,158	-0,164	-0,067
55	0,040	-0,034	-0,066	-0,114	0,038	-0,044	-0,063	-0,112
56	0,026	-0,020	-0,043	-0,072	0,024	-0,027	-0,040	-0,070
57	0,018	-0,005	-0,030	-0,043	0,016	-0,010	-0,028	-0,040
58	0,021	0,012	-0,036	-0,037	0,017	0,010	-0,031	-0,031
59	0,025	0,025	-0,045	-0,036	0,019	0,020	-0,038	-0,029
60	0,026	0,036	-0,049	-0,031	0,022	0,031	-0,044	-0,027
61	0,028	0,051	-0,055	-0,025	0,027	0,049	-0,055	-0,025
62	0,039	0,083	-0,082	-0,030	0,040	0,084	-0,085	-0,032
63	0,056	0,124	-0,122	-0,043	0,059	0,129	-0,128	-0,046
Máx	0,203	0,409	0,445	0,489	0,270	0,453	0,510	0,558

5.2 Verificações de segurança

Este parágrafo é dedicado às verificações de segurança do seguidor solar aos Estados Limites Últimos e de Utilização tendo em consideração os resultados obtidos em §5.1.

5.2.1 Verificação de segurança aos Estados Limites Últimos

As verificações de segurança aos Estados Limites Últimos foram feitas de acordo com os princípios estabelecidos pela norma europeia *EN 1993: Projecto de estruturas de Aço*, usualmente designada de Eurocódigo 3 (EC3), que é o principal documento que regulamenta a actividade de projecto de estruturas metálicas a nível nacional. Este regulamento está dividido em várias partes, das quais se destaca a primeira, a *EN 1993-1 Regras gerais e regras para edifícios* (EC3-1). Esta primeira parte está ainda subdividida em doze sub-partes, mas só destas têm interesse, para o presente trabalho, a primeira [55], *EN 1993-1-1 Regras gerais e regras para edifícios* (EC3-1-1) e a oitava [56], *EN 1993-1-8 Ligações* (EC3-1-8). Em §G.1 e §G.2 do Anexo G são apresentadas, respectivamente, as cláusulas do EC3-1-1 e EC3-1-8 necessárias para efectuar as verificações de segurança pretendidas.

5.2.1.1 Verificação da segurança das secções transversais

Previamente à verificação da segurança das secções transversais de cada um dos elementos estruturais foi necessário atribuir uma classificação a estas. Segundo o EC3-1-1, a classificação das secções transversais em C, OM, IPE 240 (secção das vigas V1, V2 e V3), e secções rectangulares ocas (secções dos tubos facar) é feita de acordo com os critérios apresentados nos quadros das Figuras G.1 e G.2 do Anexo G. A classificação de secções tubulares cilíndricas (secções das colunas grande e pequena) é atribuída segundo as disposições que constam no quadro da Figura G.3.

No Anexo H são apresentados, de forma detalhada, os cálculos efectuados com vista à classificação das secções. De acordo com os resultados obtidos, apresenta-se na tabela seguinte a classificação atribuída a cada uma das secções dos elementos estruturais.

Tabela 5.11: Classificação das secções transversais de acordo com EC3-1-1.

Secção dos elementos estruturais:	C	OM	V1, V2 e V3	TF	CG	CP
Classe da secção:	1	1	1	1	2	1

Para as secções transversais de classe 1 e 2, efectuaram-se as verificações de segurança com base nas respectivas resistências plásticas [55].

Apresenta-se, em seguida, as verificações de segurança efectuadas a cada uma das secções dos elementos estruturais, sujeitas aos esforços máximos indicados nas Tabelas 5.1-5.7. Para cada secção dos elementos estruturais referidos, de acordo com EC3-1-1, foi verificado se os esforços máximos nelas instalados são inferiores aos valores de cálculo das resistências correspondentes.

► Secção dos perfis C

Tabela 5.12: Verificação da segurança da secção dos perfis C aos esforços da combinação [P,B].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$ [kN]	$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$ [kN]	$M_{y,Ed} \leq M_{pl,Rd}$ [kNm]
ASCE	0,62	2,41	4,50
Séries	0,46 $\leq 293,75$	4,02 $\leq 72,45$	7,70 $\leq 11,28$

► Secção dos perfis OM

Tabela 5.13: Verificação da segurança da secção dos perfis OM aos esforços da combinação [P,B].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$ [kN]	$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$ [kN]	$M_{y,Ed} \leq M_{pl,Rd}$ [kNm]
ASCE	16,24	4,63	8,41
Séries	10,79 $\leq 411,25$	5,25 $\leq 131,08$	9,95 $\leq 14,23$

► Seção IPE 240 da viga V1

Tabela 5.14: Verificação da segurança da seção IPE 240 da viga V1 aos esforços da combinação [P,B].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,Ed} \leq M_{pl,y,Rd}$	$V_{y,Ed} \leq V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,Ed} \leq M_{pl,z,Rd}$	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}\right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}\right]^{\beta_d} \leq 1$
ASCE	11,83	67,58	195,04	12,10	22,10	4,83 $\nless 1,0$
Séries	12,85	$\leq 1075,80$	$\leq 303,89$	$\leq 394,23$	$\nless 20,33$	6,33 $\nless 1,0$

Unidades: N_{Ed} , N_{Rd} , $V_{z,Ed}$, $V_{pl,z,Rd}$, $V_{y,Ed}$ e $V_{pl,y,Rd}$ em [kN]; $M_{y,Ed}$, $M_{pl,y,Rd}$, $M_{z,Ed}$ e $M_{pl,z,Rd}$ em [kNm].

► Seção IPE 240 da vigas V2

Tabela 5.15: Verificação da segurança da seção IPE 240 da viga V2 aos esforços da combinação [P,A].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,Ed} \leq M_{pl,y,Rd}$	$V_{y,Ed} \leq V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,Ed} \leq M_{pl,z,Rd}$	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}\right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}\right]^{\beta_d} \leq 1$
ASCE	12,04	64,48	186,09	19,15	31,51	4,96 $\nless 1,0$
Séries	12,91	$\leq 1075,80$	$\leq 303,89$	$\leq 394,23$	$\nless 20,33$	6,25 $\nless 1,0$

Unidades: N_{Ed} , N_{Rd} , $V_{z,Ed}$, $V_{pl,z,Rd}$, $V_{y,Ed}$ e $V_{pl,y,Rd}$ em [kN]; $M_{y,Ed}$, $M_{pl,y,Rd}$, $M_{z,Ed}$ e $M_{pl,z,Rd}$ em [kNm].

► Seção IPE 240 das vigas V3

Tabela 5.16: Verificação da segurança da seção IPE 240 da viga V3 aos esforços da combinação [P,B].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$	$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,Ed} \leq M_{y,V,Rd}$	$V_{y,Ed} \leq V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,Ed} \leq M_{pl,z,Rd}$
ASCE	33,52	246,66	246,66	164,40	$\nless 12,04$	16,59
Séries	25,49	$\leq 1075,80$	$\leq 303,89$	$\nless 151,94$	$\leq 394,23$	$\leq 20,33$

Unidades: N_{Ed} , N_{Rd} , $V_{z,Ed}$, $V_{pl,z,Rd}$, $V_{y,Ed}$ e $V_{pl,y,Rd}$ em [kN]; $M_{y,Ed}$, $M_{pl,y,Rd}$, $M_{z,Ed}$ e $M_{pl,z,Rd}$ em [kNm].

Em relação às vigas V3, não é necessário fazer a verificação à flexão desviada. Como se pode observar pelos diagramas de esforços apresentados no Anexo F, nas seções onde ocorrem os momentos $M_{y,Ed}$ máximos, os valores de $M_{z,Ed}$ são nulos. Assim, a verificação à flexão desviada está implícita nas verificações efectuadas nesta tabela.

► Secção circular Ø559 mm da coluna pequena

Tabela 5.17: Verificação da segurança da secção Ø559 mm da CP aos esforços N_{Ed} e $V_{z,Ed}$ da combinação [P,A] e $M_{y,Ed}$ da combinação [S,B].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$ [kN]		$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$ [kN]		$M_{y,Ed} \leq M_{pl,Rd}$ [kNm]	
ASCE	252,56		175,76		306,38	
Séries	241,45	$\leq 7452,50$	170,79	$\leq 2159,29$	297,83	$\leq 1290,03$

Não foi tido em consideração o efeito do esforço normal no cálculo do momento flector plástico resistente uma vez que, de acordo com a equação G.24 proposta, $M_{N,Rd} = 1337,37 \text{ kNm} > M_{pl,Rd}$.

► Secção circular Ø772 mm da coluna grande

Tabela 5.18: Verificação da segurança da secção Ø772 mm da CG aos esforços da combinação [P,A].

Verificações:	$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$ [kN]		$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$ [kN]		$M_{y,Ed} \leq M_{pl,Rd}$ [kNm]	
ASCE	267,98		175,76		820,89	
Séries	175,76	$\leq 10257,50$	171,97	$\leq 2953,15$	811,94	$\leq 2434,30$

Não foi tido em conta o efeito de N_{Ed} no cálculo do momento flector plástico resistente uma vez que, de acordo com a equação G.24 proposta, $M_{N,Rd} = 2526,56 \text{ kNm} > M_{pl,Rd}$.

► Secção rectangular tubular dos tubos facar

Em relação à verificação da segurança dos tubos facar começou-se por analisar se a secção de um único tubo de dimensão $300 \times 200 \times 8 \text{ mm}$ pode resistir aos esforços máximos observados nos TF. Esta análise deveu-se ao facto de se ter observado que os esforços a que o conjunto dos três tubos facar estava submetido são relativamente pequenos, em face da capacidade resistente da sua secção. Para esta situação, mostra-se na Tabela 5.19 as verificações de segurança para os esforços máximos $V_{y,Ed}$, $V_{z,Ed}$, $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ observados nos TF, associados à combinação [P,A]. Nesta tabela, os valores de $V_{pl,T,z,Rd}$ e $V_{pl,T,y,Rd}$, são, respectivamente, os valores de cálculo do esforço transversal plástico resistente, segundo as duas direcções, reduzidos devido à presença de momento torsor. Os referidos valores, para a secção tubular oca $300 \times 200 \times 8 \text{ mm}$, são dados pela equação G.14 do Anexo G.

Foram efectuadas as mesmas verificações à secção $300 \times 200 \times 8 \text{ mm}$, quando submetida aos esforços resultantes da combinação [S,B], na qual se observou o maior valor de momento torsor, T_{Ed} (Tabela 5.20).

Tabela 5.19: Verificação da segurança da seção $300 \times 200 \times 8$ mm aos esforços da combinação [P,A].

Verificações:	τ_{Ed}	$V_{z,Ed} \leq \mathbf{V}_{pl,T,z,Rd}$	$M_{y,Ed} \leq \mathbf{M}_{pl,y,Rd}$	$V_{y,Ed} \leq \mathbf{V}_{pl,T,y,Rd}$	$M_{z,Ed} \leq \mathbf{M}_{pl,z,Rd}$	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}\right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}\right]^{\beta_d} \leq 1$	
ASCE	16,20	150,91	$\leq 456,23$	66,90	$\leq 684,35$	11,45	$0,46 \leq 1$
Séries	23,09	144,93	$\leq 434,20$	64,24	$\leq 651,28$	12,15	$0,45 \leq 1$

Unidades: τ_{Ed} em [MPa]; $V_{z,Ed}$, $V_{pl,z,Rd}$, $V_{y,Ed}$ e $V_{pl,y,Rd}$ em [kN]; $M_{y,Ed}$, $M_{pl,y,Rd}$, $M_{z,Ed}$ e $M_{pl,z,Rd}$ em [kNm].

Tabela 5.20: Verificação da segurança da seção $300 \times 200 \times 8$ mm aos esforços da combinação [S,B].

Verificações:	τ_{Ed}	$V_{z,Ed} \leq \mathbf{V_{pl,T,z,Rd}}$	$V_{z,Ed} \leq \mathbf{0,5 \cdot V_{pl,T,z,Rd}}$	$M_{y,Ed} \leq \mathbf{M_{y,V,Rd}}$	$V_{y,Ed} \leq \mathbf{V_{pl,T,y,Rd}}$	$M_{z,Ed} \leq \mathbf{M_{pl,z,Rd}}$	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,V,Rd}}\right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}\right]^{\beta_d} \leq 1$				
ASCE	138,07	59,58	$\leq 66,25$	59,58	$\leq 33,13$	26,91	$\leq 139,91$	19,73	$\leq 99,38$	8,48	$0,23 \leq 1$
Séries	132,00	58,73	$\leq 82,52$	58,73	$\leq 41,26$	26,53	$\leq 143,90$	21,47	$\leq 123,78$	9,25	$0,23 \leq 1$

Unidades: τ_{Ed} em [MPa]; $V_{z,Ed}$, $V_{pl,z,Rd}$, $V_{y,Ed}$ e $V_{pl,y,Rd}$ em [kN]; $M_{y,Ed}$, $M_{pl,y,Rd}$, $M_{z,Ed}$ e $M_{pl,z,Rd}$ em [kNm].

Da análise das tabelas anteriores, é possível concluir que os momentos flectores $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ máximos nas vigas V1 e V2 são superiores aos valores de cálculo das respectivas capacidades resistentes plásticas da secção IPE 240, $M_{pl,y,Rd}$ e $M_{pl,z,Rd}$. As secções das referidas vigas não cumprem também o critério estabelecido por EC3-1-1 quanto à flexão desviada. Na Tabela 5.16 mostra-se que os momentos $M_{y,Ed}$ máximos observados nas vigas V3 são superiores aos respectivos valores $M_{y,V,Rd}$. Quanto às secções dos restantes elementos estruturais (C, OM, TF, CP e CG) foram cumpridas todas as exigências do EC3-1-1. Em relação aos TF, provou-se, pelos cálculos efectuados, que uma única secção $300 \times 200 \times 8$ mm resiste aos esforços máximos observados e, conseqüentemente, é verificada a resistência da secção composta pelos três tubos facar.

5.2.1.2 Verificação da segurança da coluna grande à encurvadura

Neste parágrafo apresentam-se os resultados relativos à verificação da resistência da coluna grande, de comprimento $L = 3,982$ m e diâmetro $\varnothing 762$ mm, à encurvadura.

A verificação da resistência de elementos estruturais à encurvadura, de acordo com EC3-1-1, é apresentada em §G.1.2 do Anexo G. De acordo com a equação G.28, a resistência à encurvadura da coluna grande é verificada se, em qualquer secção desta, o esforço axial de compressão actuante, N_{Ed} , fôr inferior ao valor de cálculo da resistência à encurvadura, $N_{b,Rd}$.

Para secções de classe 2, $N_{b,Rd}$ é dado pela equação G.29 do §G.1.2, em função da área da secção, A , tensão de cedência, f_y , e do coeficiente de redução para o modo de encurvadura relevante, χ . No caso de elementos solicitados a compressão axial, o valor de χ é determinado pela equação G.30, em função do parâmetro Φ e da esbelteza adimensional $\bar{\lambda}$. Esta última é obtida a partir da equação G.31, em função do comprimento de encurvadura, L_{cr} , raio de giração, i , e parâmetro λ_1 . O parâmetro Φ é dado pela equação G.32, em função de $\bar{\lambda}$ e do factor de imperfeição, α_i . O valor deste factor está indicado na Tabela G.1 e corresponde a uma curva de encurvadura **a** (Figura G.5). Os valores obtidos para cada uma das referidas grandezas são indicados no quadro seguinte.

L_{cr} [m]	i [m]	λ_1	$\bar{\lambda}$	α	Φ	χ
7,964 m	0,264	86,39	0,335	0,21	0,570	0,969

O valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido, $N_{b,Rd}$, para $\chi = 0,969$, $A = 0,0373$ m², $f_y = 275 \cdot 10^3$ kPa, é 9940,40 kN.

Na Tabela 5.8, observa-se que o valor máximo do esforço de compressão N_{Ed} , verificado na coluna grande, é de 267,98 kN. Como $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$, a secção circular oca, Ø762 mm, verifica a segurança à encurvadura.

5.2.1.3 Verificação da resistência das ligações aparafusadas L_1 , L_2 e L_3

Atendendo às exposições do §G.2 do Anexo G, de acordo com EC3-1-8 [56] foram verificadas as resistências dos parafusos ao corte e à tracção das ligações L_1 , L_2 e L_3 descritas em §4.2.1.4. As propriedades dos aços das ligações por parafusos, nomeadamente os valores nominais da tensão de cedência, f_{yb} , e da tensão de rotura à tracção, f_{ub} , são apresentados em §4.2.2.2. Os parafusos das ligações L_1 , L_2 e L_3 são, todos eles, de classe 10.9. Para esta classe, o valor da tensão de rotura à tracção é $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$.

As ligações L_1 , L_2 e L_3 são efectuadas, respectivamente, por parafusos M16, M20 e M12, ou seja, por parafusos cujos diâmetros de rosca (d) são, respectivamente, 16 mm, 20 mm e 12 mm. Apresentam-se no quadro seguinte as áreas da secção resistente, A_s , e da secção lisa, A , dos referidos parafusos.

Rosca (diâmetro d)	M12	M16	M20
Área da secção resistente, $A_s \text{ [m}^2\text{]}$	$8,43 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$
Área da secção lisa, $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [m}^2\text{]}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$

De acordo com EC3-1-8, foi verificado se os valores do esforço transversal, $F_{v,Ed}$, e de tracção, $F_{t,Ed}$, a que os parafusos M12, M16 e M20 estão sujeitos, são inferiores, respectivamente, aos valores de cálculo das resistências ao corte, $F_{v,Rd}$, e à tracção, $F_{t,Rd}$. Estas duas últimas grandezas são dadas pelas equações G.35 e G.36 do §G.2, respectivamente. Nestas equações, para os tipos de parafusos em questão, $\alpha_v = 0,5$ (classe 10.9) e $k_2 = 0,9$. O coeficiente parcial de segurança para ligações por parafusos, γ_{M2} , é 1,25. De acordo com as referidas equações, apresentam-se na tabela seguinte os valores de $F_{v,Rd}$ e $F_{t,Rd}$ dos parafusos M12, M16 e M20.

Tabela 5.21: Valores de $F_{v,Rd}$ e $F_{t,Rd}$, segundo EC3-1-8, dos parafusos M12, M16 e M20.

	M12	M16	M20
$F_{v,Rd} \text{ [kN]}$	45,24	80,40	125,66
$F_{t,Rd} \text{ [kN]}$	60,70	113,04	176,40

► Resistência da ligação L₁

Ao longo do trabalho, designou-se genericamente ligação L₁ a cada uma das seis ligações existentes entre os dois perfis L e as duas vigas V3, envolvendo quatro parafusos M16 de classe 10.9 cada.

Para verificar a segurança dos quatro parafusos M16 à tracção e ao corte é necessário averiguar, respectivamente, o valor dos esforços máximos transverso, $V_{z,Ed}$, e axial, N_{Ed} , nas secções H, I e J.

Na Figura F.21(b) do Anexo F observa-se que os esforços transversos máximos, que provocam tracção nos parafusos, ocorrem nas secções I_e e I_d (esquerda e direita do nó I), e têm valor, em módulo, 246,46 kN e 145,17 kN, respectivamente. O esforço axial máximo N_{Ed} , resultante da análise estática e da combinação de acções [P,A], ocorre na secção J_d (direita do nó J), e tem valor 36,94 kN.

É verificada a resistência ao corte e à tracção de um parafuso M16, e consequentemente da ligação L₁, uma vez que se verificam as condições:

$$F_{t,Ed} = \frac{246,46 + 145,17}{4} = 97,91 \text{ kN} \leq F_{t,Rd} = 113,04 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{36,94}{4} = 9,24 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 80,40 \text{ kN}.$$

► Resistência da ligação L₂

A ligação L₂ corresponde à ligação da viga V1 ou V2 a uma viga V3. Esta ligação é concebida por duas chapas de ligação que, através de seis parafusos M20, são aparafusadas às almas das vigas. Como na informação técnica da estrutura disponibilizada pela empresa não consta a informação relativa à espessura da chapa não será verificada a resistência ao esmagamento desta.

Para conferir a resistência da ligação L₂ é necessário analisar os esforços nas secções A e B das vigas V1 e V2, respectivamente, ou nas secções G e K das vigas V3, uma vez que se considerou contínua a ligação entre as vigas V1 e V2 e as vigas V3. A determinação do esforço de corte por parafuso, $F_{v,Ed}$, é condicionada pelo maior esforço transverso segundo o eixo de maior inércia, $V_{z,Ed}$, verificado nas referidas secções. O maior valor observado é $V_{z,Ed} = 78,10 \text{ kN}$.

O esforço de corte de valor $78,10/2 = 39,05 \text{ kN}$ é transmitido a dois dos seis parafusos M20 da ligação, o que equivale a um esforço por parafuso de $39,05/2 = 19,53 \text{ kN}$. Está assegurada a resistência ao corte do parafuso M20, e por conseguinte da ligação L₂, uma vez que é satisfeita a condição abaixo indicada.

$$F_{v,Ed} = 19,53 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 125,66 \text{ kN}$$

Não foi verificada a resistência da ligação L_2 à tracção uma vez que só a resistência de um parafuso M12, de valor $F_{t,Rd} = 176,40 \text{ kN}$, é muito superior a qualquer um dos valores de N_{Ed} observados nas secções das vigas V1, V2 e V3, onde ocorre a ligação L_2 .

► Resistência da ligação L_3

A ligação entre os perfis OM ou C às vigas V1 ou V2 é concebida da mesma forma e designou-se, genericamente, de ligação L_3 .

A verificação da ligação L_3 foi feita com base nos esforços obtidos nos perfis OM uma vez que, comparando os esforços obtidos nos perfis C e OM apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, é possível verificar que os perfis OM, em relação aos C, estão sujeitos aos maiores esforços. Se para os esforços máximos instalados no perfil OM for garantida a segurança da ligação L_3 , não é necessário verificar a resistência desta para os esforços nos perfis C.

Como se pode observar pelo diagrama de esforço transversal apresentado na Figura F.31 Anexo F, os esforços transversos máximos, $V_{z,Ed}$, que provocam tracção nos parafusos, ocorrem na secção à esquerda (16_e) e à direita (16_d) do nó 16 e têm valor 3,27 kN e 3,76 kN, respectivamente.

Como foi referido em §5.1.1, constatou-se que nos perfis OM₆ e OM₇ o esforço axial é superior ao observado nos restantes perfis. O valor de N_{Ed} máximo ocorre na secção 61 (combinação [P,A]) e tem valor 16,24 kN (vd. Figura F.9(c) do Anexo F).

É garantida a resistência do parafuso M12 à tracção e ao corte e, assim, da ligação L_3 , uma vez que são satisfeitas, respectivamente, as condições

$$F_{t,Ed} = \frac{3,27+3,76}{2} = 7,03 \text{ kN} \leq F_{t,Rd} = 60,70 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{16,24}{2} = 8,12 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 45,24 \text{ kN}.$$

5.2.2 Verificação da segurança aos Estados Limites de Utilização

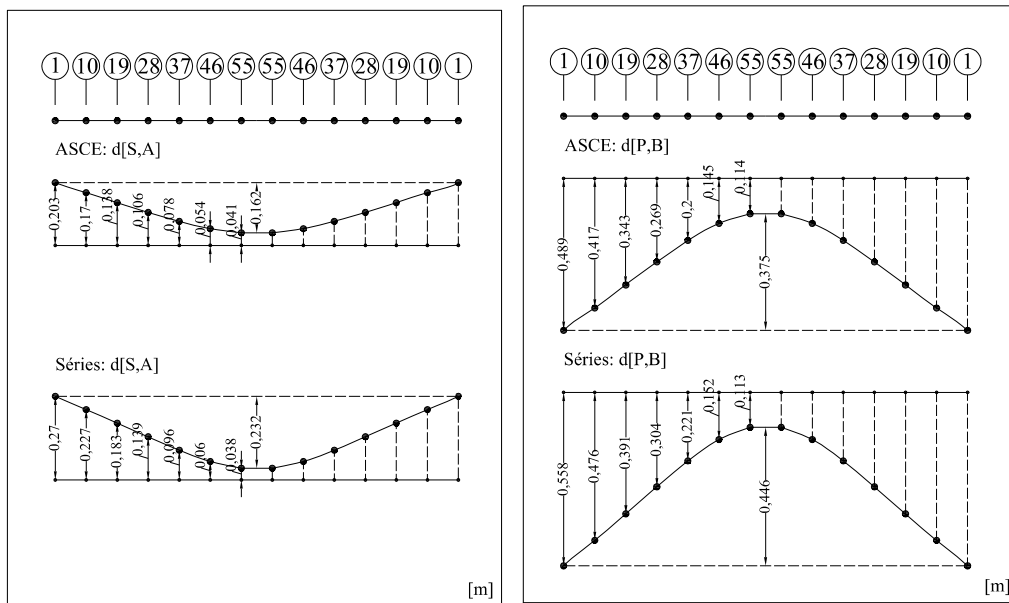
Em §5.1.2, para as acções a que o seguidor solar está sujeito (acção do vento, peso próprio da estrutura e dos painéis fotovoltaicos), observou-se que a flecha máxima no topo da coluna pequena, de altura 3,89 m, é de aproximadamente 11,6 mm. Para as acções definidas, a deformação deste elemento é desprezável e, por conseguinte, não põe em causa a estabilidade global da estrutura.

Sendo o seguidor solar uma estrutura metálica concebida para, exclusivamente, suportar os painéis fotovoltaicos é fulcral que as suas deformações não causem danos nestes. Neste sentido, foram analisados os deslocamentos e as deformações, apresentados em §5.1.2, do ponto de vista dos seus efeitos sobre os painéis.

A Tabela 5.10 mostra, como seria expectável, que os deslocamentos nodais máximos, quer na análise estática quer na dinâmica, ocorrem nas extremidades da malha metálica, nos perfis U_1 e U_2 .

Nas Figuras 5.13(a) e (b) são apresentados, respectivamente, os deslocamentos dos nós do perfil U_1 (fileira de nós f.1), para os casos em que o vento induz a “abaixamento” (d[S,A]) e “levantamento” (d[P,B]) da malha metálica. As referidas combinações de acções são as que conduzem aos maiores deslocamentos neste elemento estrutural.

Como se pode verificar na Figura 5.13(b), o maior deslocamento do nó 1, relativamente ao deslocamento do nó situado a meio do perfil U_1 , é 0,446 m (446 mm). Este deslocamento traduz, para metade do comprimento de U_1 (6,56 m), uma “flecha” de 0,446 m. Para o caso em que a acção do vento induz a deslocamentos “ascendentes” dos nós do perfil U_1 , a “flecha” máxima observada é 0,232 m.



(a) Deslocamentos “ascendentes”.

(b) Deslocamentos “descendentes”.

Figura 5.13: Deslocamentos “ascendentes” e “descendentes” dos nós do perfil U_1 .

Capítulo 5. Resultados

Do mesmo modo apresentam-se nas Figuras 5.14(a) e (b) os deslocamentos nodais “ascendentes” e “descendentes”, respectivamente, do perfil U_2 . Para os dois casos referidos, os deslocamentos máximos, relativamente ao deslocamento do nó equidistante das extremidades do referido perfil, são, respectivamente, 0,325 m e 0,382 m.

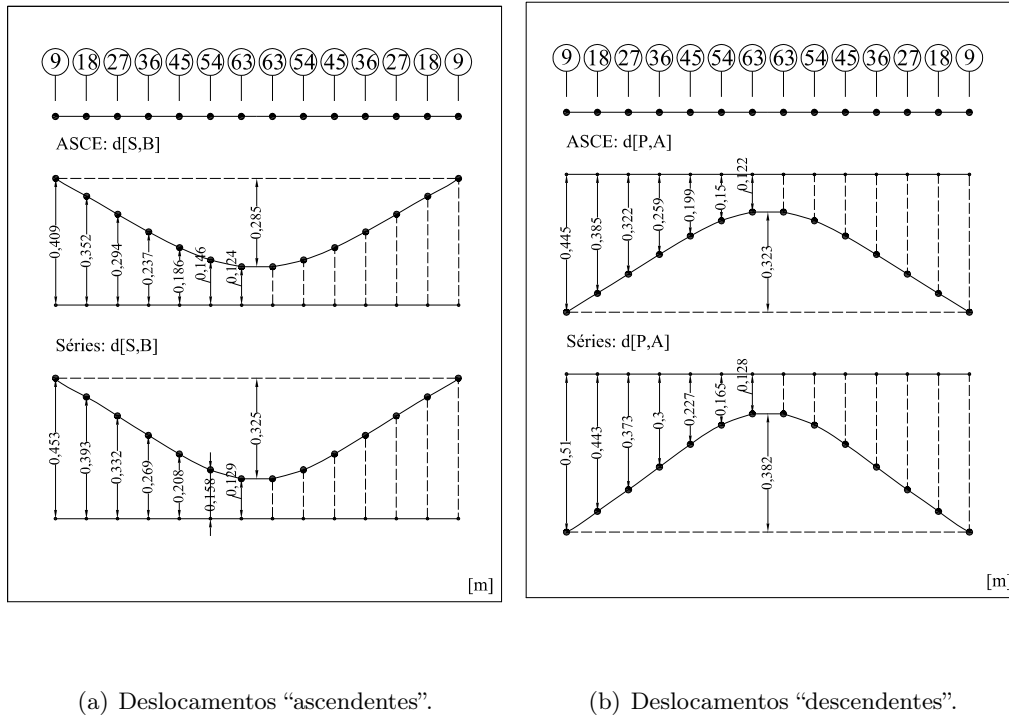


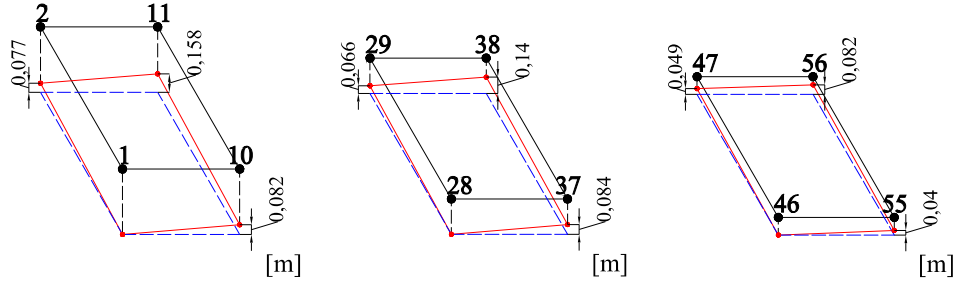
Figura 5.14: Deslocamentos “ascendentes” e “descendentes” dos nós do perfil U_2 .

De acordo com o que foi exposto anteriormente, conclui-se que, para as acções consideradas, os deslocamentos nodais máximos na malha metálica são relativamente elevados. Os painéis fotovoltaicos, ao estarem aparafusados à malha metálica nos referidos pontos, estão sujeitos a deslocamentos da mesma ordem de grandeza.

Para um dado painel fotovoltaico importa analisar os deslocamentos relativos entre os quatro nós correspondentes à sua ligação à malha metálica. Nesse sentido, foram seleccionados os nós de seis painéis fotovoltaicos, dispostos na periferia da malha metálica, onde se observam os maiores deslocamentos.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 apresentam-se, respectivamente, os valores dos deslocamentos relativos “descendente” ($d[P,B]$) e “ascendente” ($d[S,A]$) dos nós associados a cada um dos painéis

figurados. Para estes nós, os referidos deslocamentos são medidos em relação ao deslocamento máximo neles observado.

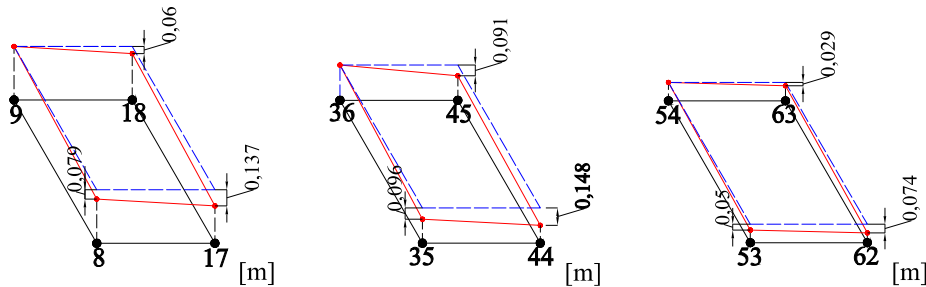


(a) Painel 1-2-10-11.

(b) Painel 28-29-37-38.

(c) Painel 46-17-55-56.

Figura 5.15: Deslocamentos “descendentes” relativos nos painéis fotovoltaicos.



(a) Painel 8-9-17-18.

(b) Painel 35-36-44-45.

(c) Painel 53-54-62-63.

Figura 5.16: Deslocamentos “ascendentes” relativos nos painéis fotovoltaicos.

Perante a ordem de grandeza dos deslocamentos dos nós da malha metálica, podem ocorrer duas situações nos painéis fotovoltaicos: arrancamento destes por rotura das ligações à malha metálica ou, no caso de tal não ocorrer, a sua danificação em virtude do valor elevado dos deslocamentos relativos entre os nós. Qualquer uma das situações é indesejável, pois põe em causa o bom funcionamento dos painéis fotovoltaicos.

5.3 Análise e discussão dos resultados

Relativamente aos efeitos da acção do vento, tal como foi definida na presente dissertação, verificou-se que os problemas de segurança se situam ao nível do suporte metálico. Efectivamente, do estudo efectuado, mostrou-se que as vigas V1, V2 e V3 não cumprem os requisitos do EC3-1-1: os valores dos momentos flectores máximos $M_{y,Ed}$ observados nas vigas V1 e V2 são aproximadamente o dobro do valor da capacidade resistente plástica, $M_{pl,y,Rd}$, da secção IPE 240; na viga V3 o valor de $M_{y,Ed}$ máximo excede em 70% o valor de $M_{pl,V,Rd}$ (momento flector plástico resistente reduzido).

No que diz respeito às colunas grande e pequena, observou-se, com base nos esforços obtidos e verificações de segurança efectuadas, que eles estão sobredimensionados, uma vez que a capacidade resistente das respectivas secções é muito superior aos esforços máximos verificados. Na verdade, para estes, obtiveram-se valores de $N_{pl,Rd}/N_{Ed}$ e $M_{pl,Rd}/M_{Ed}$ muito elevados: 29,5 e 4,2 para a coluna pequena e 38,3 e 3,0 para a coluna grande, respectivamente. Assim, poderiam ter sido adoptadas, para estas colunas, secções de menor diâmetro.

Em relação aos três tubos facar soldados entre si provou-se que, para os esforços verificados, bastava apenas um destes tubos para satisfazer as condições de segurança estabelecidas em EC3-1-1.

Da análise efectuada aos deslocamentos nodais na malha metálica concluiu-se que estes são maioritariamente elevados, atingindo, num dos quatro cantos da malha, o valor máximo de 558 mm. Um grande número desses deslocamentos compromete a segurança dos painéis fotovoltaicos a eles sujeitos, pois que, uma vez que estes têm um comportamento frágil, facilmente são danificados.

Em termos dos resultados obtidos das análises estática e dinâmica realizadas, concluiu-se que: os esforços nos perfis U, OM e vigas V1 e V2 provenientes da análise dinâmica conduziram, respectivamente, a valores superiores aos obtidos por análise estática; de forma inversa, esta análise conduziu, nas vigas V3, tubos facar e grupo coluna, a valores de esforços superiores aos que resultaram da análise dinâmica.

Segundo as especificações do fabricante do seguidor, este foi dimensionado para resistir à velocidade do vento máxima de 125 km/h, aproximadamente 35 m/s. Nessas especificações não constam, contudo, o método adoptado para determinar a pressão do vento sobre o seguidor correspondente à velocidade máxima permissível do vento referida.

No presente estudo, a velocidade usada no cálculo da pressão do vento sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos é a velocidade de pico do vento de valor $V = 40$ m/s, que corresponde à velocidade média de 27 m/s proposta pelo Anexo Nacional que complementa o EC1. Uma vez que para este valor, as vigas V1, V2 e V3 não satisfazem os princípios estabelecidos em EC3-1-1 ($M_{Ed} > M_{pl,Rd}$), inferiu-se, de acordo com esta norma, o valor da velocidade máxima de pico do vento sobre os painéis para o qual resultem os esforços máximos admissíveis na viga V1, cuja secção é a mais esforçada. Assim, de acordo com os princípios da norma ASCE/SEI 7-10, determinou-se a velocidade de pico de vento, V^* , que produz a pressão máxima admissível sobre os painéis, tal que o momento $M_{y,Ed}$ na viga V1, no limite, iguale a capacidade resistente $M_{pl,y,Rd}$ da secção IPE 240 ($M_{pl,y,Rd} = 100,82$ kNm). Com recurso ao programa SAP2000, determinou-se o momento máximo $|M_{y,max}|$ na referida viga, resultante da pressão referida, assim como o momento flector devido às acções permanentes, ou seja, ao peso próprio da estrutura e dos painéis, os quais foram majorados de 1,35 ($|M_{1,35 \cdot (pp_{paineis} + pp_{est})}|$). A partir dos valores determinados para os dois momentos referidos, obteve-se, para a velocidade de pico, V^* , o valor,

$$|M_{y,max}| = |M_{pl,y,Rd}| - |M_{1,35 \cdot (pp_{paineis} + pp_{est})}| = 26,73 \approx 27 \text{ [m/s]}.$$

Conclui-se assim que para velocidades de pico que não ultrapassem 27 m/s, ou seja, para velocidades médias do vento abaixo de $V^*/G_{600s}^{3s} = 18$ m/s, é verificada a segurança da secção IPE 240 da viga V1 e, consequentemente, das vigas V2 e V3. Assim, para as acções definidas no presente estudo, se na zona da Amareleja não se verificarem velocidades de pico do vento superiores a aproximadamente 27 m/s (ou velocidades médias acima de 18 m/s), a segurança do seguidor solar não é comprometida.

Observa-se que o valor da velocidade de pico do vento (27 m/s) é muito inferior ao valor correspondente da referida velocidade indicado pelo fabricante do seguidor solar, *i.e.*, 35 m/s. Acreditando a autora da presente dissertação que o valor máximo da velocidade admissível do vento, em termos da segurança do seguidor solar, corresponde ao valor proposto pela empresa que o fabricou, considera que a discrepância entre este valor e o que foi obtido no presente estudo deve ser devida, essencialmente, aos valores dos coeficientes de pressão c_p que foram atribuídos à estrutura. Efectivamente, sendo a norma americana direccionada ao projecto de estruturas de Engenharia Civil, é expectável que esta seja conservadora na forma como define as acções, uma vez que o principal objectivo desta norma é garantir um dimensionamento para o qual não ocorra o colapso da estrutura, não pondo assim em perigo vidas humanas. O mesmo grau de exigência não é requerido ao caso do seguidor solar.

Para obter os valores dos coeficientes de pressão c_p , que melhor possam traduzir os efeitos do vento no seguidor solar, seria necessário realizar ensaios em túnel de vento ao protótipo deste, tendo em consideração o que foi exposto no capítulo 3 sobre os factores condicionantes do comportamento do vento sobre seguidores solares instalados em centrais fotovoltaicas.

Em face do exposto acerca da segurança das vigas V1, V2 e V3 e das deformações verificadas ao nível da malha metálica, ter-se-ia de proceder a algumas alterações pontuais na estrutura metálica do seguidor. Sendo o objectivo desta dissertação apenas o estudo dos efeitos do vento na estrutura em causa, optou-se por não fazer considerações relativamente a um possível reforço estrutural. No entanto, ao nível da Central Fotovoltaica da Amareleja, sugere-se a alteração da vedação existente com vista a proporcionar algum efeito de abrigo aos seguidores solares mais periféricos. De forma a conferir aos seguidores solares mais periféricos alguma protecção relativamente à acção do vento directo, julga-se que era vantajosa a substituição da vedação de rede, que circunscreve o perímetro da central, por uma malha muito mais fina que, de acordo com alguns autores [52], deve respeitar os requisitos a seguir apresentados:

- A razão entre a área de aberturas da malha da vedação e a área total desta não deve ser superior a 50%;
- A distância L_1 entre a vedação e os seguidores solares dispostos na primeira “fileira” (cf. Figura 3.4) deve ser aproximadamente igual ao dobro da altura total H destes, ou seja, $L_1 = 17,2$ m;
- A altura da vedação, H_m , deve ser superior a metade da altura do seguidor ($H/2$), mas não muito superior a H , ou seja, deve estar compreendida entre 4,3 m e 8,6 m.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

Com a realização da presente dissertação pretendeu-se quantificar a acção do vento e os seus efeitos sobre o seguidor solar da Central Fotovoltaica da Amareleja.

De acordo com o estudo efectuado, constatou-se que, para velocidades de pico do vento de 40 m/s, o seguidor solar apresentaria alguns problemas estruturais, nomeadamente, ao nível do suporte metálico. Da verificação aos Estados Limites Últimos concluiu-se que os esforços nas secções transversais das vigas V1, V2 e V3 são superiores às capacidades resistentes destas. Relativamente às mesmas vigas, concluiu-se que a segurança das suas secções transversais é verificada no caso em que a velocidade de pico do vento é inferior a 27 m/s. Por outro lado, em relação aos Estados Limites de Utilização, constatou-se que as deformações ao nível da malha metálica põem em causa a integridade da maioria dos painéis fotovoltaicos.

No que diz respeito ao grupo coluna e cabeça do seguidor mostrou-se que os elementos que os compõem estão sobredimensionados para os esforços obtidos.

Relativamente aos dois métodos de quantificação da acção do vento usados, verificou-se que a análise dinâmica conduziu a esforços nos perfis U e OM e vigas V1 e V2 superiores aos que, respectivamente, foram obtidos por análise estática, mas inferiores aos que, mediante esta última análise, se observaram nas vigas V3, tubos facar e grupo coluna.

Em termos das duas vertentes do método WAWS consideradas, verificou-se que a vertente associada à decomposição POD envolve, ao contrário do que sucede com a outra, um grande

volume de cálculos que torna o processo muito moroso.

Na especificação técnica da estrutura do seguidor, que foi facultada, não é feita nenhuma referência ao tipo de estudos que foram realizados para verificar a resistência do seguidor à acção do vento. Na impossibilidade de obter a confirmação da validade dos resultados obtidos na presente tese por outros métodos, muito particularmente, por ensaios do protótipo da estrutura em túnel de vento, não é possível tirar qualquer conclusão sobre a razoabilidade dos mesmos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível identificar vários aspectos que merecem estudo mais aprofundado. Nesse sentido propõe-se:

- Ensaio do seguidor solar em túnel do vento e comparação dos resultados com os obtidos no presente trabalho.
- Medições da velocidade do vento *in situ* para averiguar sobre a sua grandeza na zona da Amareleja. Devem ser, também, feitas medições no interior da Central para inferir sobre o *efeito de abrigo* que os seguidores solares conferem uns aos outros.
- Análise do comportamento da unidade de rotação para os esforços obtidos resultantes das acções de vento definidas no presente trabalho. No modelo de análise, como referido, este elemento estrutural foi omitido.
- Verificação da estabilidade da fundação, em termos do derrubamento e deslizamento da sua base, para as reacções obtidas no encastramento.

Bibliografia

- [1] Comissão Europeia. [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <URL: http://www.ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/index_pt.htm>.
- [2] Acciona; Central Solar Fotovoltaica de Amareleja, referência mundial no desenvolvimento de energias renováveis. [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <URL: http://www.acciona-energia.es/media/315790/Central%20solar%20fotovoltaica%20de%20Amareleja_Portugu%C3%A9s.pdf>.
- [3] Acciona. [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <URL: www.acciona.com>.
- [4] STi norland. [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <<http://www.stinorland.com/en/>>.
- [5] YingliSolar. [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <<http://www.yinglisolar.com/>>.
- [6] Scaletchi, I., Visa, I. e Velicu, I.; Modeling wind action on solar tracking PV platforms. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, 3:115-122, 2010.
- [7] Velicu, R., *et al.*; Wind loads on an azimuthal photovoltaic platform. Experimental study. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'10)*, Granada (Espanha), 2011.
- [8] Cosoiu, C., *et al.*; Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel. *4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08)*, Algarve (Portugal), 2008.
- [9] Bitsuamlak, G., Dagnew, A. e Erwin, J.; Evaluating of wind loads on solar panel modules using CFD. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Carolina do Norte (EUA), 2010.

- [10] MacAlpine, D.; Computational fluid dynamics or wind tunnel modeling modeling. [Consult. 9 Abr. 2013]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.envirometrics.com/abstracts/CFDvsWT.pdf>>.
- [11] Peterka, A., *et al.*; Wind load reduction for heliostats. Relatório técnico, Solar Energy Research Institute, Colorado (EUA), 1986.
- [12] Peterka, A., *et al.*; Mean and peak wind load reduction on heliostasts. Relatório técnico, Solar Energy Research Institute, Colorado (EUA), 1987.
- [13] Peterka, A., *et al.*; Wind loads on heliostasts and parabolic dish collectors. Relatório técnico, Solar Energy Research Institute, Colorado (EUA), 1988.
- [14] Hosoya, N., *et al.*; Wind tunnel tests of parabolic trough solar collectors. Relatório técnico, Solar Energy Research Institute, Colado (EUA), 2003.
- [15] Banks, D.; How wind load studies will impact the solar industry. Relatório técnico, Cermak Peterka Peterson Inc., Collorado (EUA), 2010.
- [16] Banks, D.; Wind loads on solar panels. Cermak Peterka Peterson, Colorado (EUA). [Consult. 5 Out. 2012] Disponível na WWW: <URL: https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/SOLAR2012_0483_presentation.pdf>.
- [17] Zapffe, C.; Expert statement on the wind loads impacting solar modules with different inclinations from below. Relatório técnico, Enginerring Office for Contructive Engineerind on Solar Planning, Kirchdorf (Suiça), 2011.
- [18] Mohapatra, S.; Wind tunnel investigation of wind load on a ground mounted photovoltaic tracker. Tese de Mestrado, Colorado Stated University, 2011.
- [19] Miller, R., Zimmerman, K.; Wind loads on flat-plate photovoltaic-arrays fields (nonsteady winds). Relatório técnico, Boeing Engineering and Construction, Seattle (EUA), 1981.
- [20] Wang, Y.; Simulation of fluctuating wind pressure for heliostat by autoregressive model method. Jiaying College, China. [Consult. em Dez. 2012] Disponível na WWW: <URL:<http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201002/1264356824rxtkc2e.pdf>>.
- [21] Simiu, E., Scanlan, R.; *Wind effects on structures: fundamentals applications to design*. John Wiley & Sons, 3ª ed., 1996.

- [22] Castro, G., *et al.*; Simulación numérica del campo de velocidad del viento atmosférico utilizando el método de representación espectral. *Mecánica Computacional*, XXVI:144-160, 2007.
- [23] Petrini, R.; A probabilistic approach to performance-based wind engineering. Tese de Doutorado, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, 2009.
- [24] Davenport, G.; *The treatment of wind loading on tall buildings*. Proceedings of Symposium on Tall Buildings, vol. 4, pp. 3-44, 1967.
- [25] Lopes, M.; Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da acção do vento sobre edifícios. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [26] Zhou, Y., Kijewski, T. e Kareem, A.; Along-wind load effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards. *Journal of Structural Engineering*, 126(8):788-796, 2002.
- [27] CEN, Bruxelas, Bélgica: *NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1. Acções em estruturas. Parte 1-4: Acções do vento*, 2010.
- [28] ASCE, Nova Iorque, EUA: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, 2010.
- [29] Zhou, Y., Kareem, A.; Definition of wind profiles in ASCE 7. *Journal of Structural Engineering*, 128(8):1082-1086, 2002.
- [30] Solari, G., Kareem, A.; On the formulation of ASCE 7-95 gust effect factor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77&78:673-684, 1998.
- [31] Von Kármán, T.; *Aerodynamics*. McGraw-Hill, vol. IX, 1963.
- [32] Kolmogorov, N.; *Dissipation of energy in a locally isotropic turbulence*. Doklady Akad, vol. 32, pp. 141, 1941.
- [33] Dryden, L., Kuether, M.; Effect of turbulence in wind tunnel measurements. Relatório técnico, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D.C. (EUA), 1930.
- [34] Camarinha, R; Apontamentos da disciplina de Estruturas de Edifícios Altos, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [35] Azevedo, J.; Apontamentos da disciplina de Dinâmica e Engenharia Sísmica, Universidade Técnica de Lisboa, 1996.

- [36] Borri, C., Pastò, S.; Apontamentos da disciplina de Ingegneria del Vento, Università di Firenze. [Consult. 23 Maio 2013] Disponível na WWW: <URL: http://people.dicea.unifi.it/cborri/Lezioni_Ing_VENTO.pdf>.
- [37] Magnago, R., Fisch, G. e Moraes, O.; Análise espectral do vento no centro de lançamento de alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25:260-269, 2002.
- [38] DNV, Noruega: *DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads*, 2010.
- [39] Sichani, T., Pedersen, J. e Nielsen, R.; Stochastic subspace modelling of turbulence. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58:323-333, 2009.
- [40] Shinozuka, M.; Simulation of nonstationary random process. *Journal of Engineering Mechanics*, 93:11-40, 1967.
- [41] Shinozuka, M.; Digital simulation of random process and its application. *Journal of Sound and Vibration*, 25:111-128, 1972.
- [42] Shinozuka, M., Jan, M.; Simulation of multivariate and multidimensional random processes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49:347-357, 1991.
- [43] Shinozuka, M., Deodatis, G.; Simulation of stochastic process by spectral representation. *ASME Applied Mechanics Reviews*, 44:191-204, 1991.
- [44] Ubertini, F., Giuliano, F.; Computer simulation of stochastic wind velocity fields for structural response analysis: comparisons and applications. *Advances in Civil Engineering*, 2010:1-20, 2010.
- [45] Li, J., Li, C. e Chen, S.; Spline-interpolation-based FFT approach to fast simulation of multivariate stochastic processes. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011:1-23, 2011.
- [46] Pinheiro, M.; Simulação numérica da acção de vento turbulento considerando correlação espacial. *9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications*, Santa Maria (Brasil), 2010.
- [47] Chen, X., Kareem, A.; Proper orthogonal decomposition-based modeling analysis and simulation of dynamic wind load effects on structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(4):325-339, 2005.

-
- [48] Thai Hoa, L., Tamura, Y.; Analysis and identification of multivariate random pressure fields using covariance and spectral proper transformations. *VNU Journal of Science, Mathematics - Physics*, 24:209-222, 2008.
- [49] Thai Hoa, L.; Proper orthogonal decomposition and recent advanced topics in wind engineering. *VNU Journal of Science, Mathematics - Physics*, 25:21-38, 2009.
- [50] Allé, J.; Escoamento viscoso externo: forças aerodinâmicas. [Consult. 23 Maio 2013] Disponível na WWW: <URL: http://www.feng.pucrs.br/lsvm/MaqFluxo/Maq-Fluxo/MECFLU_Cap11_Forcas_Aerodinamicas.pdf>.
- [51] Kareem, A., Zhou, Y.; Gust loading factor - past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91:1301-1328, 2003.
- [52] Bashor, R., Kareem, A.; Comparative study of major international standards. *The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Taipei (Taiwan), 2009.
- [53] Zhou, Y., *et al.*; Gust loading factor new model. *Journal of Structural Engineering*, 127:168-175, 2001.
- [54] Pinto, A. *et al.*; Descrição de seguidores solares e a sua aplicação em centrais fotovoltaicas conectadas à rede. *III Congresso Brasileiro de Energia Solar*, São Paulo (Brasil), 2010.
- [55] Murphy, M.; Wind loading on tracking and field mounted solar collectors. Relatório técnico, Solar Energy Research Institute, Colorado (USA), 1980.
- [56] Blessmann, J; *Aerodinâmica das construções*, Universidade UFRGS, 2ª ed., 1990.
- [57] STi norland. Seguidor solar de 1 eje azimutal STi-A150. Manual de uso y mantenimiento.
- [58] CEN, Bruxelas, Bélgica: *NP EN 1993-1-1, Eurocódigo 3. Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, 2008.
- [59] CEN, Bruxelas, Bélgica: *NP EN 1993-1-8, Eurocódigo 3. Projecto de estruturas de aço. Parte 1-8: Projecto de ligações*, 2010.
- [60] Jeffrey, L., Grover, E.; Analysis of wind loads on Thompson technology industries solar panel installation systems. Relatório técnico, Aptech Engineering Services, Inc., California (EUA), 2008.
- [61] CEN, Bruxelas, Bélgica: *EN 1990, Eurocode 0. Basis of structural design*, 2002.

Bibliografia

- [62] Ellingwood, R., Beraki, P.; Wind load statistics for probability-based structural design. *Journal of Structural Engineering*, 125:453-463, 1999.
- [63] Simões, R.; *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas*. CMM, 2^a ed., 2007.
- [64] Ramos, R.; Nova filosofia de cálculo de estruturas de aço - Eurocódigo 3. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 1993.

Anexo A

Caracterização Geométrica das Secções Transversais

▷ Perfis U: Secção UPE 100

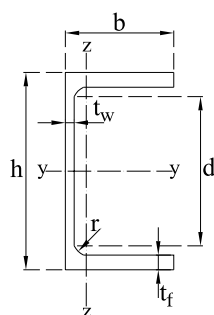


Figura A.1: Secção transversal UPE 100.

Tabela A.1: Características geométricas do perfil U.

Designação	h [mm]	b [mm]	d [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	r [mm]	A [m ²]
UPE 100	100	55	65	4,5	7,5	10	$1,25 \cdot 10^{-3}$

Tabela A.2: Propriedades da secção transversal U.

$A_{v,z}$ [m ²]	I_y [m ⁴]	I_z [m ⁴]	$W_{el,y}$ [m ³]	$W_{el,z}$ [m ³]	$W_{pl,y}$ [m ³]	$W_{pl,z}$ [m ³]
$5,340 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-6}$	$3,830 \cdot 10^{-7}$	$4,140 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$4,800 \cdot 10^{-5}$	$1,930 \cdot 10^{-5}$

▷ Perfis OM: Secção OM

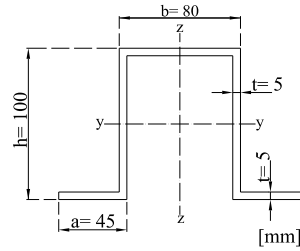


Figura A.2: Secção transversal OM.

Tabela A.3: Propriedades da secção transversal OM.

A [m ²]	A _{v,z} [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	W _{el,y} [m ³]	W _{el,z} [m ³]	W _{pl,y} [m ³]	W _{pl,z} [m ³]
1,750·10 ⁻³	9,661·10 ⁻⁴	2,524·10 ⁻⁶	3,045·10 ⁻⁶	4,914·10 ⁻⁵	3,806·10 ⁻⁵	6,056·10 ⁻⁵	6,763·10 ⁻⁵

▷ Vigas V1, V2 e V3: Secção IPE 240

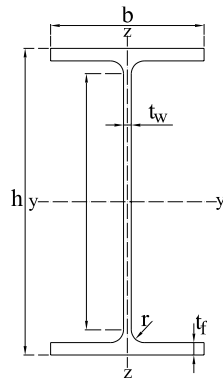


Figura A.3: Secção transversal IPE 240.

Tabela A.4: Características geométricas da secção IPE 240.

Designação	h [mm]	b [mm]	d [mm]	t _w [mm]	t _f [mm]	r [mm]	A [m ²]
IPE 240	240	120	190,4	6,2	9,8	15	3,912·10 ⁻³

Tabela A.5: Propriedades da secção transversal IPE 240.

A _{v,z} [m ²]	A _{v,y} [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	W _{el,y} [m ³]	W _{el,z} [m ³]	W _{pl,y} [m ³]	W _{pl,z} [m ³]
1,914·10 ⁻³	2,483·10 ⁻³	3,892·10 ⁻⁵	2,836·10 ⁻⁶	3,243·10 ⁻⁴	4,724·10 ⁻⁵	3,666·10 ⁻⁴	7,392·10 ⁻⁵

▷ Perfis L: Secção L203×152×25,4 mm

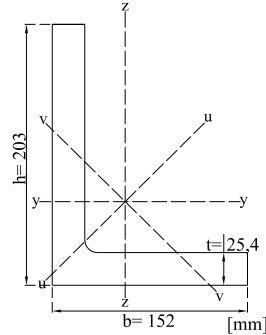


Figura A.4: Secção transversal L203×152×25,4 mm.

Tabela A.6: Propriedades da secção transversal L203×152×25,4 mm.

A [m ²]	A _{v,z} [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	W _{el,y} [m ³]	W _{el,z} [m ³]	W _{pl,y} [m ³]	W _{pl,z} [m ³]
8,37·10 ⁻³	4,624·10 ⁻³	3,350·10 ⁻⁵	1,600·10 ⁻⁵	2,470 ·10 ⁻⁴	1,450·10 ⁻⁴	4,455·10 ⁻⁴	2,644·10 ⁻⁴

▷ Tubos Facar: Secção tubular rectangular 300×200×8 mm

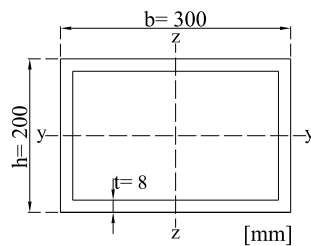


Figura A.5: Secção transversal tubular rectangular 300×200×8 mm.

Tabela A.7: Propriedades da secção transversal do tubo rectangular 300×200×8 mm.

A [m ²]	A _{v,z} [m ²]	A _{v,y} [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	I _t [m ⁴]	W _{el,y} [m ³]	W _{el,z} [m ³]	W _{pl,y} [m ³]	W _{pl,z} [m ³]
7,680	3,200	4,800	5,257	9,877	1,039	5,257	6,585	5,962	7,898
·10 ⁻³	·10 ⁻³	·10 ⁻³	·10 ⁻⁵	·10 ⁻⁵	·10 ⁻⁴	·10 ⁻⁴	·10 ⁻⁴	·10 ⁻⁴	·10 ⁻⁴

Anexo A. Caracterização Geométrica das Secções Transversais

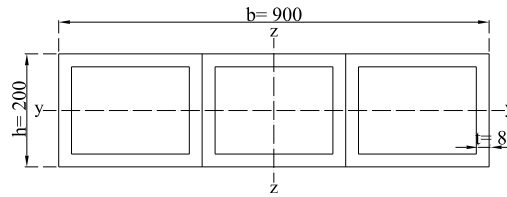


Figura A.6: Secção transversal composta por três tubos rectangulares $300 \times 200 \times 8$ mm.

Tabela A.8: Propriedades da secção composta por três tubos rectangulares $300 \times 200 \times 8$ mm.

A [m ²]	$A_{v,z}$ [m ²]	$A_{v,y}$ [m ²]	I_y [m ⁴]	I_z [m ⁴]	I_t [m ⁴]	$W_{el,y}$ [m ³]	$W_{el,z}$ [m ³]	$W_{pl,y}$ [m ³]	$W_{pl,z}$ [m ³]
2,304	9,481	1,350	1,577	1,690	4,480	1,577	3,756	1,789	5,436
$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$

► Tubos contraventamento: Secção tubular rectangular 50×50 mm

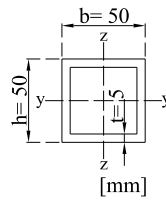


Figura A.7: Secção transversal tubular rectangular 50×50 mm.

Tabela A.9: Propriedades da secção tubular rectangular 50×50 mm.

A [m ²]	$A_{v,z}$ [m ²]	I_y [m ⁴]	I_z [m ⁴]	$W_{el,y}$ [m ³]	$W_{el,z}$ [m ³]	$W_{pl,y}$ [m ³]	$W_{pl,z}$ [m ³]
$9,000 \cdot 10^{-4}$	$5,000 \cdot 10^{-4}$	$3,075 \cdot 10^{-7}$	$3,075 \cdot 10^{-7}$	$1,230 \cdot 10^{-5}$	$1,230 \cdot 10^{-5}$	$1,525 \cdot 10^{-5}$	$1,525 \cdot 10^{-5}$

▷ Coluna pequena: Secção tubular circular Ø559 mm

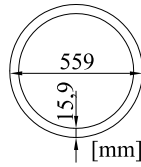


Figura A.8: Secção transversal tubular circular Ø559 mm.

Tabela A.10: Propriedades da secção tubular circular Ø559 mm.

A [m ²]	A _v [m ²]	i [m]	I [m ⁴]	I _t [m ⁴]	W _{el} [m ³]	W _{pl} [m ³]
$2,710 \cdot 10^{-2}$	$1,360 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-1}$	$1,001 \cdot 10^{-3}$	$2,002 \cdot 10^{-3}$	$3,582 \cdot 10^{-3}$	$4,691 \cdot 10^{-3}$

▷ Coluna grande: Secção tubular circular Ø762 mm

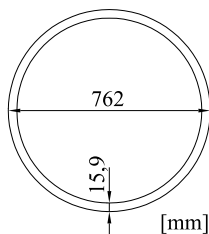


Figura A.9: Secção transversal tubular circular Ø762 mm.

Tabela A.11: Propriedades da secção tubular circular Ø762 mm.

A [m ²]	A _v [m ²]	i [m]	I [m ⁴]	I _t [m ⁴]	W _{el} [m ³]	W _{pl} [m ³]
$3,730 \cdot 10^{-2}$	$1,860 \cdot 10^{-2}$	$2,64 \cdot 10^{-1}$	$2,594 \cdot 10^{-3}$	$5,189 \cdot 10^{-3}$	$6,810 \cdot 10^{-3}$	$8,852 \cdot 10^{-3}$

Anexo B

Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

Nas Figuras B.1 e B.2 são apresentados, respectivamente, os registos meteorológicos relativos à velocidade média na estação meteorológica da Amareleja e na estação mais próxima desta, a de Beja. Para esta estação foram ainda fornecidos os registos de velocidade máxima instantânea ou de rajada, cujos valores são indicados nas Figuras B.3-B.5.

Como se pode observar na Figura B.1, a velocidade média do vento a $z_{ref} = 1,5$ m, no período citado, é de 9,0 km/h, ou seja, de 2,5 m/s. Utilizando a função de potência da equação 2.2, que define o perfil da velocidade média do vento em altura, obteve-se esta grandeza a uma altura de 10 m, $\bar{v}(10)$, a partir da velocidade de 2,5 m/s a $z_{ref} = 1,5$ m, considerando que $\alpha = 0,16$. O valor da velocidade média do vento a 10 m de altura, assim calculado, é $\bar{v}(10) = 3,5$ m/s.

Para a estação meteorológica de Beja, de acordo com a Figura B.2, verifica-se que a velocidade média do vento, entre o ano 1951 e 1980, a 1,5 m de altura é de 15,3 km/h ou seja, 4,3 m/s. Da mesma forma, aplicando a lei de potência atrás referida, conclui-se que a 10 m de altura a velocidade média do vento é 5,8 m/s.

Anexo B. Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

ESTACÃO AMARELEJA
 MÉDIAS DE 1963/1980
 $\phi = 38^{\circ}13'N$; $\lambda = 20^{\circ}13'W$; $g = 9,8003 m/s^2$; $\Delta G = 0 h$; $H_s = 192 m$; $H_b = \dots m$; $h_1 = 1,5 m$; $h_2 = 4,0 m$; $h_3 = 4,0 m$; $h_4 = 1,5 m$

Vento																		
Frequência (%) e velocidade média \bar{f} (km/h) para cada rumo																		Velocid. média
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	\bar{f} (km/h)									
10,6	8,3	12,7	7,1	11,4	8,8	16,3	9,5	12,3	12,2	13,4	9,6	5,7	11,2	12,6	8,6	5,0	8,7	
8,2	8,9	10,2	8,6	14,4	9,9	14,3	10,6	10,9	13,4	15,6	10,9	8,8	12,6	14,8	10,1	2,8	9,8	
12,1	9,9	9,7	8,9	12,5	10,3	10,1	10,1	8,4	11,2	14,5	10,7	11,2	11,5	19,8	11,1	1,6	9,3	
11,8	10,4	11,8	9,2	8,6	10,0	6,8	9,6	7,3	12,9	14,6	10,1	13,2	11,0	24,0	11,4	1,8	9,3	
12,1	9,9	7,9	10,2	5,0	10,6	6,0	10,6	10,2	14,2	15,5	11,5	16,0	12,0	26,4	12,4	0,9	10,0	
8,5	9,7	6,9	10,5	4,0	10,7	5,6	9,8	10,6	12,6	19,8	10,9	17,1	11,2	26,5	10,7	0,9	9,5	
9,3	11,5	6,1	8,8	4,5	11,6	3,9	8,9	7,7	11,9	17,5	9,0	21,2	11,5	27,3	11,5	2,6	9,1	
12,1	11,1	7,2	9,4	4,0	8,3	4,2	9,2	6,3	11,7	15,6	9,3	15,8	11,4	32,9	12,3	1,9	9,0	
7,6	11,3	6,7	9,0	8,4	8,6	8,2	9,1	10,0	11,8	18,2	9,7	14,9	10,7	23,9	10,4	2,1	8,2	
8,6	9,6	12,1	9,2	14,1	9,5	14,8	10,0	9,0	11,5	14,2	9,1	8,2	10,7	15,4	9,6	3,6	8,4	
13,5	7,6	15,0	7,3	12,7	8,5	15,8	8,9	9,6	11,5	9,7	8,2	4,4	9,4	14,8	9,5	4,5	8,2	
15,9	8,7	14,6	7,0	13,6	9,4	12,8	10,2	8,3	13,8	11,3	11,1	2,9	11,8	13,6	9,9	6,9	8,0	
10,9	9,7	10,1	8,5	9,3	9,5	9,8	9,7	9,2	12,4	15,0	10,0	11,7	11,3	21,1	10,9	2,9	9,0	

Número de dias															
Temperatura do ar T			Velocidade do vento f		Nebulosidade N		Precipitação R			Neve	Granizo	Trovoada	Nevoeira	Orvalho	Geadas
Min < 0,0°	Max > 25,0°	Min > 20,0°	f > 36,0 km/h	f > 55,0 km/h	N > 8	N > 2	R > 0,1 mm	R > 1,0 mm	R > 10,0 mm	*	◁	⚡	☁	☂	☁
3,9	0,0	0,0	0,1	0,0	12,5	7,6	11,4	9,5	2,6	0,0	0,1	0,4	3,0	1,8	6,5
1,9	0,0	0,0	0,1	0,0	11,0	5,6	12,0	10,1	2,6	0,0	0,2	0,5	2,2	2,3	4,0
0,6	0,7	0,0	0,0	0,0	9,8	8,2	10,5	8,6	2,1	0,0	0,2	1,0	1,6	2,9	1,8
0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	8,9	8,6	8,6	6,8	1,2	0,0	0,2	1,7	1,1	2,8	0,0
0,0	12,2	0,1	0,0	0,0	7,3	11,2	6,3	5,2	0,9	0,0	0,1	1,6	0,4	0,9	0,0
0,0	22,2	0,3	0,0	0,0	5,4	12,3	4,2	3,5	1,0	0,0	0,0	2,1	0,6	0,1	0,0
0,0	30,5	1,7	0,1	0,0	1,8	21,4	0,7	0,5	0,1	0,0	0,0	1,0	0,6	0,0	0,0
0,0	30,3	1,2	0,0	0,0	1,7	22,1	0,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2	0,0	0,0
0,0	24,3	0,7	0,0	0,0	4,2	12,7	3,3	2,3	0,5	0,0	0,1	1,9	0,3	0,0	0,0
0,0	10,4	0,0	0,1	0,0	6,9	11,3	7,7	6,1	2,2	0,0	0,0	1,3	1,0	0,3	0,0
1,4	0,5	0,0	0,0	0,0	7,6	9,9	8,7	7,4	1,9	0,0	0,0	0,4	2,7	2,8	2,2
5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,1	9,6	9,6	7,6	2,2	0,0	0,1	0,4	3,8	1,4	7,6
12,8	134,0	4,0	9,4	0,0	37,2	140,5	83,6	68,1	17,3	0,0	1,0	12,9	17,5	15,3	22,1

Figura B.1: Registos da velocidade média na estação metereológica da Amareleja.

Anexo B. Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

ESTACÃO BEJA

MÉDIAS DE 1951-1980

$\phi = 38^{\circ}01'N$; $\lambda = 7^{\circ}52'W$; $g = 9,8000 \text{ m/s}^2$; $\Delta G = 0 \text{ m/s}^2$; $H_s = 246 \text{ m}$; $H_b = 247 \text{ m}$; $h_t = 1,5 \text{ m}$; $h_u = 10,0 \text{ m}$; $h_d = 10,0 \text{ m}$; $h_e = 1,5 \text{ m}$

Vento																	57-80
Frequência (%) e velocidade média \bar{f} (km/h) para cada rumo																	Velocidade média \bar{f} (km/h)
-----1956-80-----																	
N	NE		E		SE		S		SW		W		NW		C		
7,4	11,6	12,4	12,2	15,9	13,0	12,6	18,1	9,4	17,0	15,5	18,7	16,7	16,3	9,6	14,2	0,4	15,6
9,4	11,3	12,9	13,4	11,5	12,7	10,1	18,3	11,0	18,7	17,4	21,7	18,8	18,6	8,3	15,3	0,5	16,4
8,2	14,3	10,7	13,9	11,0	13,6	8,7	16,0	7,3	16,4	16,4	19,9	24,2	17,4	13,2	15,7	0,4	15,9
12,3	13,5	10,0	14,2	7,0	12,1	6,1	13,7	6,8	17,0	13,0	17,8	26,8	17,0	17,7	15,6	0,4	15,3
9,4	13,9	6,5	14,3	4,5	13,1	5,6	13,9	7,2	15,4	14,2	16,3	32,3	16,7	19,8	15,6	0,4	15,4
7,4	13,3	5,4	13,5	4,7	11,3	5,5	12,9	7,6	13,7	13,1	15,7	38,1	16,8	17,6	15,3	0,4	15,1
6,5	13,6	3,4	12,6	4,1	10,9	4,5	12,8	5,8	12,8	9,2	13,8	42,4	17,2	23,6	15,8	0,3	15,7
7,1	13,9	4,5	13,6	3,7	11,9	4,1	13,2	4,6	13,6	8,6	14,5	44,4	17,0	22,8	16,1	0,2	15,8
6,5	11,7	4,9	11,2	6,4	11,7	7,8	14,6	9,7	13,5	12,3	15,6	35,0	15,8	16,7	14,3	0,8	14,2
10,5	12,0	11,1	11,9	12,1	12,8	13,7	16,6	10,0	16,2	10,5	18,4	19,1	15,6	12,4	14,0	0,6	14,7
10,5	11,8	13,7	12,2	15,2	11,8	10,2	16,6	7,8	18,4	10,2	18,6	18,5	16,3	13,3	14,5	0,6	14,6
11,1	11,3	13,9	11,5	13,8	12,4	9,8	16,4	8,6	18,3	11,8	21,4	18,2	17,9	12,3	14,2	0,5	15,2
8,8	12,7	9,1	12,8	9,1	12,4	8,2	15,9	8,0	16,1	12,6	18,0	28,0	16,9	15,7	15,2	0,5	15,3

Número de dias																
Temperatura do ar T			Velocidade do vento f		Nebulosidade N		Precipitação R			Neve ★	Granizo Saraiva ◀▶	Trovoada ⚡	Nevoeiro ≡	Orvalho ☼	Geadas ⌞	Solo coberto de neve ⊠
Min < 0,0°	Max > 25,0°	Min > 20,0°	f > 36,0 km/h	f > 55,0 km/h	N > 8	N > 2	R > 0,1 mm	R > 1,0 mm	R > 10,0 mm							
1,1	0,0	0,0	1,7	0,0	7,8	8,8	13,4	9,9	2,8	0,1	0,2	0,6	7,0	8,0	3,6	0,0
0,9	0,0	0,0	2,3	0,1	7,4	8,0	13,5	10,2	2,5	0,1	0,3	1,0	5,1	6,7	2,5	0,0
0,1	0,3	0,0	1,5	0,0	7,9	8,0	12,4	9,2	2,8	0,0	0,3	1,3	5,4	8,0	1,1	0,0
0,0	2,4	0,0	0,8	0,0	6,1	9,2	9,6	6,6	1,5	0,0	0,2	2,3	4,1	7,6	0,2	0,0
0,0	12,6	0,0	0,5	0,0	4,8	11,5	7,6	5,5	1,1	0,0	0,2	1,9	3,6	7,0	0,0	0,0
0,0	22,2	0,2	0,5	0,0	2,7	13,5	4,9	2,9	0,8	0,0	0,0	1,6	2,9	5,1	0,0	0,0
0,0	30,3	1,5	0,5	0,0	0,6	22,4	1,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,7	1,7	3,8	0,0	0,0
0,0	30,4	2,0	0,4	0,0	1,1	20,8	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,3	1,5	3,2	0,0	0,0
0,0	24,4	1,2	0,3	0,0	2,6	14,2	4,4	2,4	0,5	0,0	0,0	1,6	2,9	3,6	0,0	0,0
0,0	8,9	0,0	1,1	0,0	5,3	11,4	9,8	6,7	2,3	0,0	0,0	1,8	4,2	5,5	0,0	0,0
0,1	0,4	0,0	1,5	0,0	6,0	10,8	10,9	8,1	2,6	0,0	0,1	1,3	5,2	7,2	0,6	0,0
0,8	0,0	0,0	1,9	0,1	7,2	11,0	12,4	9,1	3,1	0,0	0,1	0,8	7,5	8,5	3,7	0,0
3,0	131,9	4,9	13,0	0,2	59,5	149,6	101,4	71,7	20,0	0,2	1,4	15,2	51,1	74,2	11,7	0,0

Figura B.2: Registos da velocidade média na estação meteorológica de Beja.

Anexo B. Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

VALORES DO VENTO MAXIMO INSTANTANEO (RAJADA) EM BEJA

NOTA: VELOCIDADE EM KM/H; RUMO EM DEZENAS DE GRAU

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
1957MAX	48	91	54	54	53	49	58	37	50	38	71	65	91
RUM	32	27	27	18	23	27	14	32	9	36	27	23	27
DIA	2	17	22	5	4	9	2	17	28	2	8	11	17/ 2
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1958MAX	46	60	64	56	52	58	56	52	52	65	48	100	100
RUM	27	23	23	27	32	23	27	23	27	23	32	23	23
DIA	1	10	24	3	13	26	15	20	30	3	12	16	16/12
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1959MAX	58	51	80	67	57	63	61	53	63	74	111	98	111
RUM	14	23	27	23	14	36	23	14	18	27	27	23	27
DIA	19	2	11	13	20	30	11	27	22	27	30	9	30/11
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1960MAX	83	93	97	59	73	73	54	57	59	80	81	99	99
RUM	23	18	23	18	18	14	32	27	23	27	23	23	23
DIA	24	17	14	2	12	2	7	4	17	19	4	7	7/12
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1961MAX	73	65	50	71	64	52	53	55	60	66	86	67	86
RUM	27	18	14	23	23	23	36	23	23	23	32	23	32
DIA	22	24	17	16	30	23	3	23	18	6	11	24	11/11
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1962MAX	101	64	77	57	61	71	50	53	52	63	68	75	101
RUM	18	23	23	27	5	18	27	27	22	14	22	18	18
DIA	1	24	3	17	14	12	5	13	9	26	5	30	1/ 1
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1963MAX	83	82	77	71	69	61	53	61	59	59	69	90	90
RUM	22	22	22	22	18	22	27	31	18	22	18	22	22
DIA	2	16	12	18	6	3	12	3	15	30	9	18	18/12
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1964MAX	84	83	70	69	63	55	50	54	62	67	51	60	84
RUM	18	27	22	27	22	22	9	18	22	22	9	31	18
DIA	15	24	14	18	31	4	1	31	19	13	25	2	15/ 1
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1965MAX	79	67	89	50	52	50	57	56	59	59	73	75	89
RUM	27	14	22	27	27	27	27	27	27	18	18	31	22
DIA	20	1	1	4	29	6	19	6	9	8	16	7	1/ 3
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1965MAX	73	81	53	83	60	66	49	46	53	64	79	46	83
RUM	27	22	4	22	27	31	27	22	18	18	22	22	22
DIA	8	12	20	12	12	9	26	26	19	3	5	1	12/ 4
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1967MAX	84	89	65	70	53	65	45	46	51	65	68	59	89
RUM	22	22	27	27	22	4	22	31	14	14	22	36	22
DIA	10	17	8	8	5	4	9	24	1	22	4	10	17/ 2
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1968MAX	54	59	74	61	59	49	58	79	55	67	103	79	103
RUM	31	22	22	27	22	36	27	14	27	18	14	9	14
DIA	10	14	1	13	5	4	10	27	16	31	14	6	14/11
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1969MAX	95	92	87	57	58	47	49	43	63	58	54	66	95
RUM	23	22	22	31	22	27	18	27	27	14	22	22	23
DIA	13	21	15	13	2	22	14	23	12	17	12	29	13/ 1
HOR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
1970MAX	86	50	47	54	83	54	43	50	43	50	65	47	86
RUM	25	32	27	28	23	22	26	13	35	28	13	3	25
DIA	10	14	13	19	8	6	6	26	15	7	26	10	10/ 1
HOR	18	18	18	18	18	12	18	18	12	18	18	6	18
1971MAX	76	58	68	61	58	50	50	47	47	50	58	47	76
RUM	26	26	27	23	24	18	19	32	10	5	25	2	26
DIA	21	16	19	4	24	4	10	1	5	24	6	4	21/12
HOR	0	12	18	18	18	12	18	12	6	15	9	18	0
1972MAX	94	86	58	65	65	50	47	50	50	65	61	61	94
RUM	21	24	26	35	26	29	13	28	11	13	3	26	21
DIA	16	4	7	21	1	10	14	13	26	4	27	27	16/ 1
HOR	18	9	15	21	15	21	12	18	12	0	15	9	18
1973MAX	80	70	54	50	60	46	46	68	57	59	61	63	80
RUM	23	27	11	31	19	23	28	18	35	22	3	23	23
DIA	17	14	10	9	2	18	4	21	30	15	12	19	17/ 1
HOR	3	21	21	12	15	18	15	0	15	15	12	9	3
1974MAX	63	79	69	60	63	58	50	55	48	62	98	59	98
RUM	21	21	30	29	15	20	24	28	23	30	24	19	24
DIA	5	12	20	29	29	24	2	29	2	22	15	23	15/11

Figura B.3: Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.

Anexo B. Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

	HOR	15	18	15	12	18	18	18	15	18	18	18	18	18
1975	MAX	80	89	94	80	70	81	89	78	60	73	74	64	94
	RUM	14	13	23	12	29	14	19	34	27	14	30	18	23
	DIA	13	27	1	27	11	5	30	22	15	28	17	16	1/ 3
	HOR	18	18	12	18	18	18	18	0	18	18	18	18	12
1976	MAX	81	96	74	71	71	78	64	68	72	90	90	79	96
	RUM	24	25	19	28	4	9	29	23	19	23	24	32	25
	DIA	31	6	7	12	1	18	31	29	24	27	10	20	6/ 2
	HOR	6	18	18	12	18	18	18	18	18	0	12	18	
1977	MAX	72	91	66	67	77	79	69	64	60	80	69	79	91
	RUM	26	27	14	5	29	26	33	33	27	28	24	23	27
	DIA	23	11	9	12	3	12	28	17	16	6	20	7	11/ 2
	HOR	18	12	0	18	18	18	18	0	9	15	12	12	
1978	MAX	89	105	116	75	73	63	60	60	60	80	68	105	116
	RUM	25	22	26	26	31	25	35	36	18	17	30	29	26
	DIA	28	28	1	26	23	6	4	7	13	9	27	11	1/ 3
	HOR	15	18	0	18	12	12	12	12	15	15	15	9	0
1978	MAX	75	118	86	84	74	61	67	72	64	88	78	60	118
	RUM	29	26	24	25	28	35	7	34	35	22	26	36	26
	DIA	11	14	17	10	19	14	10	15	22	12	14	19	14/ 2
	HOR	12	18	15	15	18	12	21	9	12	15	18	15	18
1980	MAX	63	64	74	63	83	56	56	52	57	69	66	77	83
	RUM	9	9	25	33	33	33	33	35	29	25	27	5	33
	DIA	12	29	21	14	12	8	9	17	27	15	12	28	12/ 5
	HOR	15	9	9	15	15	12	12	21	21	15	12	3	15
1981	MAX	67	54	83	75	77	62	58	56	70	64	52	116	116
	RUM	3	28	28	21	24	14	28	30	23	19	9	24	24
	DIA	13	4	29	10	9	13	2	1	26	5	30	30	30/12
	HOR	15	15	6	12	15	18	18	12	0	12	15	9	9
1982	MAX	60	63	58	62	66	59	56	80	71	73	83	63	83
	RUM	26	15	12	6	3	17	27	8	18	30	27	26	27
	DIA	10	4	30	23	6	16	2	22	18	22	6	10	6/11
	HOR	18	12	15	21	18	12	18	9	18	15	18	15	18
1983	MAX	49	64	61	85	60	61	54	54	69	50	92	93	93
	RUM	11	27	27	24	24	12	26	31	16	27	26	25	25
	DIA	21	11	24	30	15	4	10	25	23	16	20	18	18/12
	HOR	12	15	15	15	15	12	21	15	18	15	12	18	18
1984	MAX	71	63	79	53	66	68	56	54	56	79	86	64	86
	RUM	27	28	26	18	23	22	26	27	28	26	28	17	28
	DIA	23	23	19	8	1	3	10	2	28	4	2	12	2/12
	HOR	15	18	18	15	12	15	21	18	15	6	6	15	6
1985	MAX	79	76	66	70	66	58	61	63	57	46	80	75	80
	RUM	17	22	26	25	29	24	24	29	4	8	-1	26	-1
	DIA	5	9	19	4	5	11	27	5	13	28	11	5	11/11
	HOR	15	18	15	18	18	18	18	15	15	12	15	12	15
1986	MAX	85	80	66	59	62	69	61	53	54	48	93	52	93
	RUM	28	23	31	32	23	22	28	29	18	19	23	22	23
	DIA	7	16	25	26	5	22	12	23	15	14	14	8	14/11
	HOR	15	21	18	18	12	18	18	18	15	15	12	9	12
1987	MAX	93	93	62	68	56	60	56	68	54	65	68	78	93
	RUM	24	32	14	27	26	24	25	14	12	21	31	18	24
	DIA	10	11	12	3	25	7	15	28	20	15	23	13	10/ 1
	HOR	0	21	15	21	18	15	12	15	15	15	15	12	0
1988	MAX	64	74	59	71	71	64	54	52	55	65	68	81	81
	RUM	33	27	7	29	26	32	32	32	9	23	16	29	29
	DIA	19	6	1	25	1	4	23	2	17	9	25	1	1/12
	HOR	18	18	12	18	15	18	15	21	15	15	9	6	6
1989	MAX	70	86	63	78	55	56	54	54	68	91	99	84	99
	RUM	33	28	31	23	17	26	30	26	24	22	25	22	25
	DIA	6	26	20	3	29	4	3	9	6	27	22	18	22/11
	HOR	21	18	15	0	18	18	21	18	21	6	21	3	21
1990	MAX	92	58	82	69	52	69	61	55	59	75	72	63	92
	RUM	23	16	15	24	31	22	7	27	18	26	24	35	23
	DIA	31	6	31	6	23	2	17	11	27	22	24	11	31/ 1
	HOR	12	0	12	9	18	0	15	18	15	15	21	15	12
1991	MAX	61	73	88	61	83	56	55	55	78	58	68	53	88
	RUM	35	27	23	36	2	27	31	18	26	28	36	14	23
	DIA	29	28	6	13	26	7	18	18	28	8	4	5	6/ 3
	HOR	18	18	0	12	15	9	18	6	15	18	15	15	0
1991	MAX	63	56	96	69	64	60	69	67	63	90	61	79	96
	RUM	17	21	34	24	18	28	18	30	27	24	30	25	34
	DIA	14	12	24	2	13	22	30	28	26	16	15	4	24/ 3
	HOR	12	15	6	18	12	18	3	15	15	15	9	21	6
1993	MAX	49	77	63	84	65	63	52	62	57	80	100	63	100
	RUM	13	36	36	29	24	23	30	27	36	24	22	34	22
	DIA	31	27	1	24	17	21	10	26	23	16	1	14	1/11

Figura B.4: Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.

Anexo B. Registos Meteorológicos do Instituto de Meteorologia, IP Portugal

	HOR	18	12	0	21	12	15	18	15	15	15	9	15	9
1994	MAX	87	79	46	64	71	59	75	63	69	59	80	55	87
	RUM	25	27	31	20	22	30	15	31	6	26	29	26	25
	DIA	10	28	1	22	12	24	15	8	29	22	9	30	10/ 1
	HOR	0	12	0	12	18	21	15	18	18	15	6	15	0
1995	MAX	86	61	64	65	73	50	55	58	57	59	61	76	86
	RUM	32	36	31	32	28	28	21	26	31	30	18	27	32
	DIA	1	10	3	20	11	13	9	10	7	4	10	30	1/ 1
	HOR	6	15	15	18	18	18	15	18	15	21	15	15	6
1996	MAX	85	92	78	85	84	57	53	50	61	71	86	73	92
	RUM	26	28	21	30	23	2	21	25	31	20	25	24	28
	DIA	6	1	24	1	6	2	14	17	18	13	11	13	1/ 2
	HOR	15	6	15	12	9	9	18	18	6	9	15	15	6
1997	MAX	76	50	57	70	80	81	63	135	72	77	90	89	135
	RUM	31	28	6	27	26	26	31	36	33	20	28	24	36
	DIA	3	14	25	21	5	5	2	22	1	18	25	18	22/12
	HOR	15	15	12	18	18	12	18	18	12	18	9	15	18
1998	MAX	92	71	78	88	80	69	60	62	96	74	66	148	148
	RUM	24	18	33	27	17	16	29	27	25	35	33	32	32
	DIA	12	2	11	9	11	1	31	17	25	6	3	31	31/12
	HOR	18	15	15	15	12	12	18	18	18	15	15	15	15
1999	MAX	99	83	84	86	92	79	68	100	89	94	78	74	100
	RUM	25	25	24	36	27	23	32	27	29	23	32	32	27
	DIA	9	9	11	15	17	1	18	7	19	20	21	15	7/ 8
	HOR	12	18	15	12	15	15	12	15	15	6	15	12	15
2000	MAX	58	63	68	92	78	76	73	65	71	90	82	106	106
	RUM	5	32	24	25	26	5	28	28	26	26	30	20	20
	DIA	10	16	30	2	23	9	23	19	19	11	6	7	7/12
	HOR	12	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Figura B.5: Registos da velocidade de rajada na estação metereológica de Beja.

Anexo C

Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30°

De forma a inferir sobre a grandeza da pressão do vento sobre o seguidor solar, determinada de acordo com a norma ASCE/SEI 7-10, e verificar se ela seria compatível com a expectável caso se se recorresse ao documento normativo usado a nível nacional, o Eurocódigo 1, admitiu-se que a cabeça do seguidor solar, conjuntamente com o suporte metálico, poderia rodar de modo a que a inclinação θ dos painéis pudesse variar entre 0° e 30° . Esta é a gama comum de valores de inclinação de uma cobertura isolada de uma vertente para a qual o Eurocódigo 1 e a ASCE apresenta valores de coeficiente de pressão c_p . Para alguns dos ângulos compreendidos no referido intervalo, em §C.2.1 comparou-se a grandeza da força do vento sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos, obtida de acordo com a ASCE e o EC1, para os casos em que o vento actua na superfície superior e inferior destes painéis. As principais directrizes do Eurocódigo 1, que permitem determinar a força exercida pelo vento em *coberturas isoladas de uma vertente*, são apresentadas em §G.1.

C.1 Força exercida pelo vento em *coberturas isoladas de uma vertente* segundo o Eurocódigo 1

Segundo o Eurocódigo 1 [28], a força exercida pelo vento sobre uma *cobertura isolada de uma vertente*, F , é dada por

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para coberturas isoladas inclinadas até ângulos de 30°

$$F = q(z) \cdot G \cdot c_f \cdot A_{ref} \quad (C.1)$$

em que $q(z)$ é a pressão dinâmica de pico à altura total da cobertura, $z = H$, c_f o coeficiente de força global, G o coeficiente estrutural e A_{ref} a área da superfície da estrutura sobre a qual o vento incide.

C.1.1 Pressão dinâmica de pico, $q(z)$

A pressão dinâmica de pico, $q(z)$, é dada pela equação

$$q(z) = |1 + 7 \cdot I_v(z)| \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}(z)^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (C.2)$$

em que ρ é a massa volúmica do ar, cujo valor recomendado pelo Anexo Nacional é 1,25 kg/m³, e v_b é o valor de referência da velocidade do vento, definido a uma altura de 10 m acima de um terreno do tipo campo aberto, dado pela equação

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (C.3)$$

em que $v_{b,0}$ é o valor característico da velocidade média do vento, relativo a períodos de dez minutos, medido a uma altura de 10 m acima de um terreno do tipo campo aberto, independentemente da direcção do vento e da época do ano; c_{dir} é o coeficiente de direcção e c_{season} , o coeficiente de sazão. O valor recomendado pelo Anexo Nacional para c_{dir} e c_{season} é 1,0. Para efeitos de quantificação de $v_{b,0}$, o Anexo Nacional propõe a divisão do País em duas zonas distintas, zona A e B, atribuindo, a cada uma delas, o respectivo valor de $v_{b,0}$ indicado na Tabela C.1.

Tabela C.1: Valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$ [28].

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
Zona A Generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B;	27
Zona B Arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira de 5 km de largura, a altitudes superiores a 600 m.	30

C.1.1.1 Velocidade média do vento, $\bar{v}(z)$

A velocidade média do vento, $\bar{v}(z)$, a uma altura z acima do nível do solo, é dada por

$$\bar{v}(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (C.4)$$

em que $c_r(z)$ e $c_o(z)$ são, respectivamente, os coeficiente de rugosidade e orografia.

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30°

Coefficiente de rugosidade, $c_r(z)$

O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, traduz a variação da velocidade média do vento com a altura acima do nível do solo, z , e com a rugosidade do terreno a barlavento da estrutura. Este coeficiente é dado por uma das relações

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq 200m \quad (C.5)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min} \quad (C.6)$$

em que z_0 é o comprimento de rugosidade e k_r o coeficiente de terreno obtido pela equação

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (C.7)$$

Nesta equação, $z_{0,II}$ representa o comprimento de rugosidade de um terreno de categoria II, dado pela Tabela C.2¹.

Tabela C.2: Categorias e parâmetros de terreno [28].

Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
I Zona costeira exposta aos ventos de mar.	0,005	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.	0,05	3
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas e florestas permanentes).	0,3	8
IV Zona na qual pelo menos 15% da superfície do terreno está coberta por edifícios com uma altura superior a 15 m.	1,0	15

Coefficiente de orografia, $c_o(z)$

Quando a orografia do terreno (por exemplo colinas, penhascos, etc.) influencia a velocidade do vento em mais do que 5%, os seus efeitos devem ser contabilizados através do coeficiente de orografia, c_o , calculado pelo Anexo Nacional. Em situações correntes o valor recomendado de c_o é 1,0.

C.1.1.2 Intensidade de turbulência, $I_v(z)$

Segundo o Eurocódigo 1, a intensidade de turbulência, $I_v(z)$, é dada por uma das duas relações a seguir indicadas

¹A tabela C.2 foi transcrita do quadro NA-4.1 do Anexo Nacional que substitui o quadro 4.1 do Eurocódigo 1.

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30°

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_r \cdot v_b \cdot k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m} \quad (\text{C.8})$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min} \quad (\text{C.9})$$

O parâmetro k_I representa o coeficiente de turbulência, cujo valor, recomendado pelo Anexo Nacional, é 1,0.

C.1.2 Coeficiente estrutural, G

De acordo com EC1, para edifícios de altura inferior a 15 m, pode-se adoptar, de forma conservativa, o valor de G igual a 1.

C.1.3 Coeficientes de força, c_f , e de pressão, c_p

Os coeficientes de força total, c_f , e de pressão resultante, c_p , para *coberturas isoladas de uma vertente*, de acordo com o EC1, foram indicados na Tabela 3.1 do §3.3.1.

C.2 Comparação entre as forças do vento em *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30° segundo a ASCE e o EC1

A força total do vento sobre uma *cobertura isolada da uma vertente*, F , segundo o Eurocódigo 1 e a norma ASCE, é determinada em função da pressão dinâmica, $q(z)$, coeficientes de pressão, c_p , ou força, c_f , coeficiente estrutural, G, e área de referência da superfície da *cobertura*, A_{ref} .

Ao longo dos *items* seguintes, apresenta-se o cálculo das grandezas intervenientes na determinação da força do vento sobre *coberturas isoladas de uma vertente* de acordo com EC1. O valor das referidas grandezas foi comparado com os obtidos através da norma ASCE (vd. §4.4.1).

▷ Valor de referência da velocidade do vento

Tendo em consideração a equação C.3 e a Tabela C.2, assim como os valores de c_{dir} e c_{season} atrás considerados, o valor de referência da velocidade do vento, segundo o Eurocódigo 1, é $v_b = 27 \text{ m/s}$.

A ASCE admite, como velocidade de referência do vento, uma velocidade de rajada relativa a períodos de 3 s. Esta foi determinada a partir de v_b recorrendo ao conceito de factor de rajada $G_v^{3s}(600s)$.

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas até ângulos de 30°*

▷ Altura de referência da *cobertura isolada de uma vertente* para cálculo da pressão $q(z)$

No caso do Eurocódigo 1, a altura de referência de uma cobertura isolada de uma vertente, para efeitos de cálculo de $q(z)$, é a altura total H . No caso do seguidor solar $H = 8,6$ m.

De acordo as directrizes da norma ASCE, a altura de referência citada corresponde à altura média da cobertura. Relativamente ao seguidor $h = 4,7$ m.

▷ Pressão dinâmica do vento, $q(z)$

De acordo com EC1, a pressão dinâmica, $q(z)$, é dada pela equação C.2, em função da intensidade de turbulência, $I_v(z)$, densidade do ar, ρ , e velocidade média do vento, $\bar{v}(z)$. Esta pressão, segundo EC1, é determinada à altura média da cobertura, $z = 8,6$ m.

A zona da Amareleja, segundo o EC1, é enquadrada num terreno de categoria II. Para este tipo de terreno, segundo a Tabela C.2, o comprimento de rugosidade, z_0 , é 0,05. Para a altura $z = 8,6$ m, $z_0 = 0,05$ m e $v_b = 27$ m/s, tem-se que $I_v(z) = 0,194$, $c_r(z) = 0,978$ m e $\bar{v}(z) = 26,41$ m/s. Para estes valores, a pressão dinâmica do vento, $q(z)$, é

$$q(z) = 1028,48 \quad [\text{N/m}^2] \approx 1,03 \quad [\text{kN/m}^2].$$

Segundo a norma ASCE, o valor de $q(z)$ obtido é $0,73 \text{ kN/m}^2$. O EC1 conduziria a uma pressão dinâmica sobre o seguidor, superior, em cerca de 30%, à obtida pela ASCE.

▷ Força do vento sobre *coberturas isoladas de uma vertente* segundo o EC1

Segundo o EC1, a força resultante sobre a *cobertura isolada*, F , é $F = 1,03 \cdot c_f \text{ kN}$. Os coeficientes de força global, c_f , para ângulos $\theta \in [0, 30^\circ]$, são obtidos da Tabela 3.1.

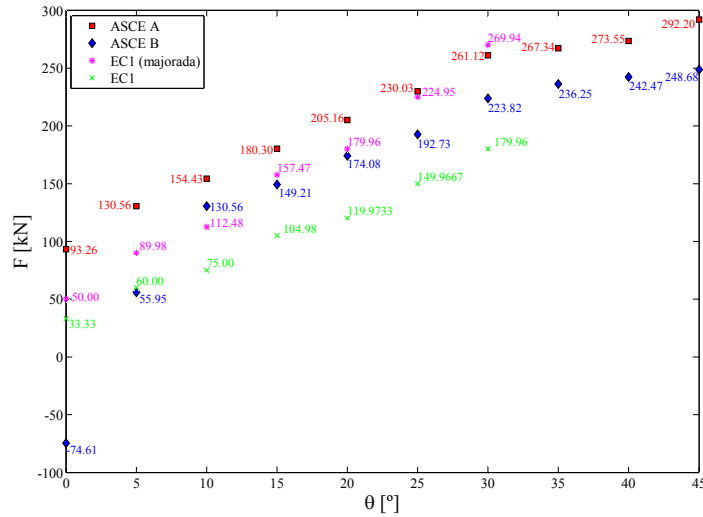
C.2.1 Forças do vento sobre *coberturas isoladas de uma vertente inclinadas até 30° de acordo com a ASCE e EC1*

De acordo com os critérios da norma ASCE/SEI 7-10 e do Eurocódigo 1, foram determinadas, para os ângulos 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° e 30° , as forças resultantes do vento, F , sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos, de área $A_{ref} = 13 \cdot 11,2 = 145,6 \text{ m}^2$, e comparadas as grandezas das forças obtidas. Os valores destas forças são indicados nos gráficos das Figuras C.1(a) e (b), para os casos em que o vento, em relação à superfície dos painéis, tem sentido ascendente e descendente, respectivamente.

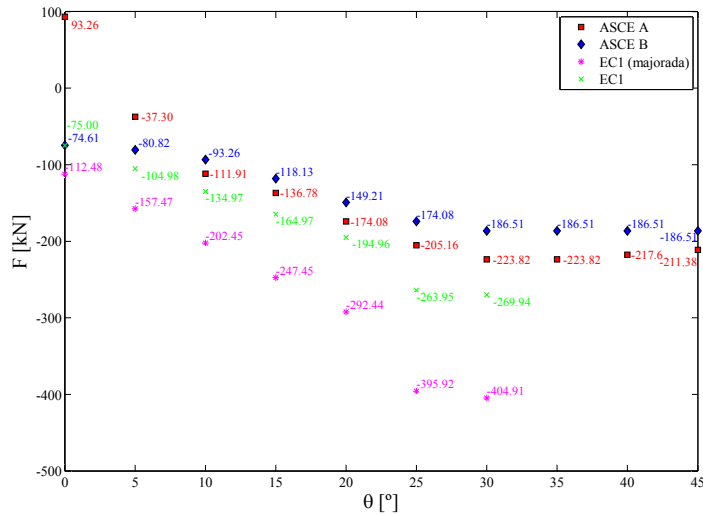
Em relação ao cálculo da acção do vento através das duas normas, devem ser feitas algumas considerações prévias. Como foi referido em §4.4.3, segundo o Eurocódigo 0, a acção do

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30°

vento determinada de acordo com o EC1 deve ser majorada por um coeficiente parcial de segurança $Q_k = 1,50$. No entanto, como foi explicado, optou-se por não majorar as acções do vento determinadas com base na norma ASCE, ou seja, admitiu-se um coeficiente parcial de segurança $Q_k = 1,00$.



(a) Sentido descendente do vento.



(b) Sentido ascendente do vento.

Figura C.1: Força total do vento sobre o seguidor solar para os ângulos θ : 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° e 30°.

Anexo C. Estudo comparativo entre a ASCE e o EC1 para *coberturas isoladas inclinadas* até ângulos de 30°

Como se pode observar nas Figuras C.1(a) e (b), existem grandes desvios entre os valores de F segundo EC1(majorado) e ASCE, no caso do vento ascendente. A norma ASCE conduz neste caso a valores mais conservativos de F e apresenta para quase todos os valores de θ desvios superiores a 50%. No caso descendente do vento observa-se uma tendência de aproximação dos valores de F da norma ASCE (caso A) e de EC1 majorado, à medida que θ cresce. Conclui-se assim que não há consenso entre as duas normas no que se refere à definição da acção do vento em estruturas do tipo *coberturas isoladas de uma vertente* e, consequentemente, em estruturas do tipo seguidor solar.

Anexo D

Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento

Neste capítulo apresentam-se as rotinas computacionais desenvolvidos no programa Matlab com fim à simulação numérica da componente flutuante da velocidade do vento. Em §D.1.1 e §D.1.2 apresenta-se, respectivamente, as rotinas desenvolvidas para simular $\tilde{v}(t)$ nos casos em que se considerou a total correlação entre séries temporais e a possível falta de total correlação entre estas.

D.1 Rotinas desenvolvidas em Matlab

A seguir apresentam-se as rotinas desenvolvidas no programa Matlab. Para melhor compreensão dos parâmetros introduzidos incluíram-se alguns comentários no programa precedidos pela sigla “%”.

D.1.1 Simulação numérica de $\tilde{v}(t)$ considerando a total correlação entre séries temporais

```
% SIMULAÇÃO DA COMPONENTE FLUTUANTE DA VELOCIDADE %  
  
close all  
clear all  
  
% Características da função temporal a ser gerada %  
m= 12;  
N= (2^m);  
  
f1= 0.01;  
fcut= 7.00;  
  
% Número de posições no tempo e na  
% frequência  
% Frequência inicial [Hz]  
% Frequência de Nyquist [Hz]
```

Anexo D. Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento

```
t1=0; % Tempo inicial [s]
T= 600; % Tempo de amostragem/Tempo final [s]

df= (fcut-f1)/(2^m-1); % Passo da frequência [Hz]
dt= T/(2^m-1); % Passo do tempo [s]

echo off

% Vectors: Tempo e Frequência %
t=t1:dt:T;
f=f1:df:fcut;

% DEFINIÇÃO DO ESPECTRO DA ASCE, Sv %
zm= 4.7; % Altura média da cobertura [m]
z= [0.8:0.975:8.6]'; % Vector com as diferentes posições na altura
nz=length(z); % Número de posições na altura
V=40; % Velocidade básica do vento [m/s]

% Definição dos parâmetros do terreno de Categoria C %
alphabarra=(1/6.5); %Expoente da função Vz
bbarra=0.65; %Factor multiplicativo da função Vz
l=152.4; %Factor multiplicativo da função Lz [m]

Ebarra=0.2; %Expoente da função Lz
c=0.20; %Factor multiplicativo da função Iv

% Velocidade média horária do vento a uma altura z, Vz [m/s]
for i=1:nz;
    Vz(i)=V*bbarra*(z(i)/10)^alphabarra;
end

% Escala integral da turbulência, Lz [m] %
for i=1:nz;
    Lz(i)=l*(z(i)/10)^Ebarra;
end

% Intensidade de turbulência, Iz %
for i=1:nz;
    Iz(i)=c*(10/z(i))^(1/6);
end

% Desvio padrão, dp %
for i=1:nz;
    dp(i)=Iz(i)*Vz(i);
end

% Espectro de potência do vento, Sv %
for i=1:nz;
    for j=1:N;
        X1(i)= Lz(i)/Vz(i);
        Sv(i,j)= (dp(i)^2*7.47*X1(i))/(1+10.3*f(j)*X1(i))^(5/3);
    end
end
```

```

figure(1)
semilogx(f,Sv(1,:), 'LineWidth',1,'Color','Yellow')
hold on
semilogx(f,Sv(2,:), 'LineWidth',1,'Color','Green')
hold on
semilogx(f,Sv(3,:), 'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
semilogx(f,Sv(4,:), 'LineWidth',1,'Color','Cyan')
hold on
semilogx(f,Sv(5,:), 'LineWidth',1,'Color','Black')
hold on
semilogx(f,Sv(6,:), 'LineWidth',1,'Color','Magenta')
hold on
semilogx(f,Sv(7,:), 'LineWidth',1,'Color','red')
hold on
semilogx(f,Sv(8,:), 'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
semilogx(f,Sv(9,:), 'LineWidth',1,'Color','Black')
hold off
xlabel('f [Hz]')
ylabel('Sv(f)')
legend('z= 0,80m','z= 1,78m','z= 2,75m','z= 3,73m',)
('z= 4,70m','z= 5,68m','z= 6,65m','z= 7,63m','z= 8,60m')
pause

% Amplitude da função harmónica %
A=zeros(nz,N);
for i=1:nz;
    for j=1:N;
        A(i,j)=sqrt(2*Sv(i,j)*df);
    end
end

A1=A(1,:);
A2=A(2,:);
A3=A(3,:);
A4=A(4,:);
A5=A(5,:);
A6=A(6,:);
A7=A(7,:);
A8=A(8,:);
A9=A(9,:);

% Determinação da componente flutuante da velocidade, v(t) %
Randnum=rand(1,N); % Número aleatório [0,1]
Randang=Randnum*2*pi; % Ângulo de fase aleatório [0,2*Pi]

vf1=zeros(1,N);
vf2=zeros(1,N);
vf3=zeros(1,N);
vf4=zeros(1,N);
vf5=zeros(1,N);
vf6=zeros(1,N);
vf7=zeros(1,N);
vf8=zeros(1,N);
vf9=zeros(1,N);

```

```

    for k=1:N;
Sum1=0;
Sum2=0;
Sum3=0;
Sum4=0;
Sum5=0;
Sum6=0;
Sum7=0;
Sum8=0;
Sum9=0;
    for j=1:N;
Sum1=Sum1 + A1(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum2=Sum2 + A2(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum3=Sum3 + A3(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum4=Sum4 + A4(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum5=Sum5 + A5(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum6=Sum6 + A6(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum7=Sum7 + A7(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum8=Sum8 + A8(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
Sum9=Sum9 + A9(j)*cos(2*pi*f(j)*t(k)+Randang(j));
    end;

vf1(k)=Sum1;
vf2(k)=Sum2;
vf3(k)=Sum3;
vf4(k)=Sum4;
vf5(k)=Sum5;
vf6(k)=Sum6;
vf7(k)=Sum7;
vf8(k)=Sum8;
vf9(k)=Sum9;
    end;

figure(2);
plot(t,vf1,'LineWidth',1,'Color','Yellow')
hold on
plot(t,vf2,'LineWidth',1,'Color','Green')
hold on
plot(t,vf3,'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
plot(t,vf4,'LineWidth',1,'Color','Cyan')
hold on
plot(t,vf5,'LineWidth',1,'Color','Black')
hold on
plot(t,vf6,'LineWidth',1,'Color','Magenta')
hold on
plot(t,vf7,'LineWidth',1,'Color','Red')
hold on
plot(t,vf8,'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
plot(t,vf9,'LineWidth',1,'Color','Black')
hold off
xlabel('t [s]')
ylabel('v̂(z,t) [m/s]')
title('Velocidade flutuante do vento:')
```



```

legend('z= 0,80m','z= 1,78m','z= 2,75m','z= 3,73m',)
('z= 4,70m','z= 5,68m','z= 6,65m','z= 7,63m','z= 8,60m')

% VELOCIDADE TOTAL DO VENTO, Vt [m/s] %

% Velocidade média do vento, Vm %
vm1=Vz(1);
vm2=Vz(2);
vm3=Vz(3);
vm4=Vz(4);
vm5=Vz(5);
vm6=Vz(6);
vm7=Vz(7);
vm8=Vz(8);
vm9=Vz(9);

% Velocidade total, Vt %
Vt1=vf1+vm1;
Vt2=vf2+vm2;
Vt3=vf3+vm3;
Vt4=vf4+vm4;
Vt5=vf5+vm5;
Vt6=vf6+vm6;
Vt7=vf7+vm7;
Vt8=vf8+vm8;
Vt9=vf9+vm9;
figure(3);
plot(t,Vt1,'LineWidth',1,'Color','Yellow')
hold on
plot(t,Vt2,'LineWidth',1,'Color','Green')
hold on
plot(t,Vt3,'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
plot(t,Vt4,'LineWidth',1,'Color','Cyan')
hold on
plot(t,Vt5,'LineWidth',1,'Color','Black')
hold on
plot(t,Vt6,'LineWidth',1,'Color','Magenta')
hold on
plot(t,Vt7,'LineWidth',1,'Color','Red')
hold on
plot(t,Vt8,'LineWidth',1,'Color','Blue')
hold on
plot(t,Vt9,'LineWidth',1,'Color','Black')
hold off
xlabel('t [s]')
ylabel('V(z,t) [m/s]')
title('Velocidade total do vento:')
legend('z= 0,80m','z= 1,78m','z= 2,75m','z= 3,73m',)
('z= 4,70m','z= 5,68m','z= 6,65m','z= 7,63m','z= 8,60m')

```

D.1.2 Simulação numérica de $\tilde{v}(t)$ considerando a possível falta de total correlação entre as séries temporais

```

% Características da função temporal a ser gerada %
m= 12;
N= (2^m);                                     % Número de posições

f1= 0.01;                                     % Frequência inicial [Hz]
fcut= 7.00;                                  % Frequência de Nyquist [Hz]

df= (fcut-f1)/(2^m-1);                       % Passo da frequência [Hz]

t1=0;                                         % Tempo inicial [s]
T= 600;                                       % Tempo de amostragem/Tempo final [s]

dt= T/(2^m-1);                               % Passo do tempo [s]

echo off

% Vectors: Tempo e Frequência %
t=t1:dt:T;
f=f1:df:fcut;

Nf=N;                                         % Número de posições na frequência
Nt=N;                                         % Número de posições no tempo

% Discretização no espaço %
y= [0:13.082/13:13.082]';                   % Vector com as diferentes posições segundo y
z= [0.8:0.975:8.6]';                         % Vector com as diferentes posições na altura z

Ny= length(y);
Nz=length(z);
Np= Ny*Nz;                                   % Número de pontos

% Coordenadas (y,z) dos 126 pontos %
Yr= reshape(y*ones(1,Nz),Np,1);
Zr= reshape(ones(Ny,1)*z',Np,1);

Pontos=[Yr,Zr];                             % Coordenadas (y,z) dos 126 pontos
Npz= length(Zr);

% DEFINIÇÃO DO ESPECTRO DA ASCE, Sv %

V=40;                                         % Velocidade básica do vento [m/s]

% Definição dos parâmetros do terreno de Categoria C %
alphabarra=(1/6.5);                         %Expoente da função Vz
bbarra=0.65;                                 %Factor multiplicativo da função Vz
l=152.4;                                     %Factor multiplicativo da função Lz [m]
Ebarra=0.2;                                 %Expoente da função Lz
c=0.20;                                     %Factor multiplicativo da função Iv

```

```

% Velocidade média horária do vento a uma altura z, Vz [m/s]
Vz=zeros(Npz,1);
for i=1:Npz;
    Vz(i)=V*bbarra*(Zr(i)/10)^alphabarra;
end

% Escala integral da turbulência, Lz [m] %
Lz=zeros(Npz,1);
for i=1:Npz;
    Lz(i)=l*(Zr(i)/10)^Ebarra;
end

% Intensidade de turbulência, Iz %
Iz=zeros(Npz,1);
for i=1:Npz;
    Iz(i)=c*(10/Zr(i))^(1/6);
end

% Desvio padrão, dp %
for i=1:Npz;
    dp(i)=Iz(i)*Vz(i);
end

% Espectro de potência do vento, Sv %
Sv= zeros(Npz,Npz,Nf);
for i= 1:Npz
    for j= 1:Nf
        Sv(i,i,j)= (dp(i)^2*7.47*Lz(i,i)/Vz(i))/(1+10.3*f(1,j)*Lz(i,i)/Vz(i))^(5/3);
    end
end

% Definição da função de coerência, Coh %
r=zeros(Np,Np);
for j=1:Np
    for l=j+1:Np
        r(j,l)=((y(j,1)-y(l,1))^2+(z(j,1)-z(l,1))^2)^0.5;
        r(l,j)=r(j,l);
    end
end

C=10;
epcoh=zeros(Np,Np,Nf);
for j=1:Np
    for l=(j+1):Np
        for i=1:Nf
            epcoh(j,l,i)=((w(i).*C.*r(j,l))./(0.5.*(Vz(j,1)+Vz(l,1))));
            epcoh(l,j,i)=epcoh(j,l,i);
        end
    end
end

Coh=zeros(Np,Np,Nf);
for j=1:Np
    for i=1:Nf

```

% Distância entre os pontos (j,l) [m]

% Expoente da função de coerência

% Função de coerência segundo Davenport

Anexo D. Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento

```
Coh(j,j,i)=1;
end
end
for j=1:Np
for l=j+1:Np
for i=1:Nf
Coh(j,l,i)=(exp(-1.00.*epcoh(j,l,i)));
Coh(l,j,i)=Coh(j,l,i);
end
end
end

%Espectro de potência cruzado do vento, Sv %
Svv=zeros(Npz,Npz,Nf);
for i=1:Npz
for j=1:Nf
Svv(i,i,j)= Sv(i,i,j);
end
end
for j=1:Nf
for i=1:Npz
for l=1+i:Npz
Svv(i,l,j)=(Sv(i,i,j)*Sv(l,l,j))^0.5*Coh(i,l,j);
Svv(l,i,j)=Svv(i,l,j);
end
end
end

% Decomposição POD %

vectorproprio= zeros(Npz,Npz,Nf);
valorproprio= zeros(Npz,Npz,Nf);

for j= 1:Nf
[vectorproprio(:,j),valorproprio(:,j)]= eig(Svv(:,j));
end

% Geração das séries temporais %

Y=zeros(Npz,Npz,Nf);
for k=1:Nt
for i=1:Npz
for j=1:Nf
Randnum=rand(1,Npz,Nf); % Número aleatório [0,1] %
Randang=Randnum*2*pi; % Ângulo de fase aleatório [0,2Pi] %
Y(:,i,j)= 2*(valorproprio(i,i,j)*df)^0.5*((vectorproprio(:,i,j)))*cos(2*pi*f(j)*t(k) + Randang(1,i,j));
end
end

vf=zeros(Nt,Npz,Npz);
for i= 1:Npz
for j= 1:Npz
vf(k,i,j)= sum(Y(j,i,:));
end
end
end
```

```
VF=zeros(Npz,Nt);
for k=1:Nt
for j=1:Npz
VF(j,k)=sum(vf(k,:,j));
end
end
```

D.2 Geração de séries temporais recorrendo à primeira rotina computacional desenvolvida em Matlab

Recorrendo à primeira rotina desenvolvida no programa Matlab geraram-se, para diferentes ângulos de fase aleatórios, com séries temporais relativas a $\tilde{v}(t)$. Em §D.1.1, para efeitos da simulação, como referido, considerou-se apenas o espectro do vento preconizado na norma ASCE. Embora que em §D.1.1 não tenham sido considerados os espectros de Davenport e o preconizado no Eurocódigo 1, na presente situação introduziram-se, adicionalmente, na rotina desenvolvida, os espectros atrás citados. Para cada um dos três espectros do vento considerados, foram simuladas com séries temporais, cujas frequências se situam no intervalo $f \in [0,01;6,00]$ Hz. Na tabela D.2 são apresentadas as amplitudes máximas (Máx) e mínimas (Mín) da velocidade flutuante, verificadas em cada uma das cem séries.

Tabela D.3: Valores máximos e mínimos das séries temporais obtidas através do programa Matlab.

Séries	ASCE		EC1		Davenport	
	Máx $\tilde{v}(t)$	Mín $\tilde{v}(t)$	Máx $\tilde{v}(t)$	Mín $\tilde{v}(t)$	Máx $\tilde{v}(t)$	Mín $\tilde{v}(t)$
1	17,71	-14,79	12,44	-15,59	15,86	-13,76
2	14,59	-12,82	15,82	-12,69	16,89	-12,11
3	15,90	-17,68	14,00	-13,75	19,03	-14,77
4	16,85	-14,13	15,86	-14,62	18,52	-13,32
5	16,34	-15,26	15,13	-15,72	16,59	-15,31
6	14,38	-14,64	14,31	-15,08	16,59	-12,22
7	17,56	-14,62	15,70	-16,44	18,18	-12,73
8	14,72	-13,73	15,67	-17,04	14,86	-16,69
9	13,44	-12,94	18,79	-14,01	13,28	-16,11
10	12,92	-12,62	18,82	-18,20	15,88	-14,96
11	17,42	-15,32	16,37	-15,53	16,47	-15,57
12	14,72	-14,41	14,92	-17,82	17,24	-12,96
13	15,52	-13,35	15,16	-14,18	15,55	-14,18
14	15,34	-13,74	16,41	-18,40	15,37	-14,36
15	14,40	-13,60	14,56	-13,58	13,61	-13,80

Anexo D. Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento

16	12,58	-14,23	13,90	-13,28	16,46	-14,49
17	11,58	-16,59	16,63	-15,38	15,31	-15,71
18	16,43	-16,04	15,23	-15,12	13,74	-16,65
19	14,76	-18,31	14,66	-14,16	12,82	-12,86
20	15,15	-13,64	13,81	-13,38	14,32	-12,71
21	16,53	-12,26	13,77	-16,31	14,22	-14,76
22	17,62	-13,30	16,01	-14,86	15,56	-18,06
23	14,30	-16,75	14,62	-15,92	15,51	-15,56
24	14,56	-18,31	16,09	-19,11	17,44	-14,12
25	17,62	-16,36	15,23	-17,03	14,30	-14,60
26	17,59	-14,20	18,10	-13,47	16,58	-15,98
27	14,21	-14,65	15,78	-15,35	17,31	-13,33
28	13,04	-13,14	14,68	-15,70	14,87	-14,62
29	14,13	-13,55	18,57	-15,97	15,00	-13,18
30	12,87	-17,62	14,98	-17,90	11,46	-13,50
31	14,83	-16,67	13,86	-19,45	15,09	-15,14
32	13,52	-16,45	16,69	-14,47	17,19	-13,50
33	14,29	-16,14	13,16	-14,17	13,51	-14,25
34	17,42	-13,11	19,49	-16,06	13,67	-14,87
35	12,35	-12,84	15,76	-13,21	15,10	-13,72
36	13,36	-14,88	15,46	-16,00	17,40	-15,95
37	13,14	-13,74	14,45	-16,48	15,58	-16,74
38	16,03	-14,60	16,34	-13,91	14,59	-15,48
39	13,18	-15,80	17,74	-14,94	13,10	-17,08
40	15,15	-17,39	15,99	-15,07	13,97	-16,86
41	14,21	-14,46	12,54	-16,60	14,96	-15,47
42	18,45	-11,26	16,97	-15,99	13,50	-16,94
43	15,56	-14,54	13,86	-19,58	13,59	-13,72
44	16,06	-14,86	18,66	-16,02	16,34	-13,16
45	17,70	-12,09	14,10	-18,57	15,28	-15,32
46	11,70	-19,05	14,66	-16,70	13,00	-16,99
47	12,27	-13,85	13,68	-13,85	15,12	-17,76
48	15,11	-14,45	17,39	-14,33	18,81	-18,81
49	16,08	-13,07	16,83	-17,86	15,31	-12,64
50	13,93	-16,96	17,49	-14,16	15,87	-12,96
51	17,56	-14,62	15,47	-15,00	14,88	-13,89
52	14,72	-13,73	13,39	-16,94	14,74	-13,95
53	13,44	-12,94	15,09	-15,27	16,77	-15,45
54	12,95	-12,62	15,04	-16,66	14,84	-16,37
55	15,32	-17,42	16,67	-18,48	12,47	-16,27
56	14,41	-16,75	17,33	-19,25	16,44	-14,35
57	15,52	-13,35	15,18	-17,66	15,61	-14,80
58	15,34	-13,74	18,80	-14,02	11,68	-16,22
59	14,40	-16,60	13,57	-15,54	14,98	-18,18
60	12,58	-14,24	12,17	-17,96	15,83	-12,88
61	11,58	-16,50	14,43	-13,80	13,37	-18,16
62	16,43	-16,04	14,69	-15,17	14,63	-13,94
63	14,76	-18,31	17,17	-15,86	11,70	-16,54

Anexo D. Simulação Numérica da Velocidade Flutuante do Vento

64	15,15	-13,64	16,26	-13,76	15,42	-16,25
65	16,53	-12,26	12,89	-15,81	14,26	-15,31
66	17,62	-13,30	15,46	-14,27	16,56	-15,39
67	14,30	-16,75	14,13	-15,92	14,05	-13,55
68	14,56	-13,64	13,87	-14,03	12,82	-15,00
69	17,62	-16,36	15,42	-15,98	15,08	-14,75
70	17,59	-14,20	14,80	-13,68	15,57	-15,71
71	14,21	-14,65	13,96	-12,68	14,03	-14,66
72	13,04	-13,14	15,42	-15,67	14,05	-12,40
73	14,13	-13,55	16,21	-14,75	17,41	-14,80
74	12,87	-13,73	17,86	-16,03	15,98	-16,83
75	14,83	-16,67	19,19	-15,85	13,21	-16,54
76	13,52	-16,45	18,10	-18,83	17,09	-13,13
77	14,29	-16,14	15,51	-15,18	14,90	-16,46
78	17,42	-13,11	14,40	-14,50	12,53	-15,63
79	12,35	-12,84	16,92	-16,08	14,91	-17,24
80	13,36	-14,88	14,26	-18,98	19,81	-14,15
81	13,14	-13,74	14,93	-17,75	14,54	-16,49
82	16,03	-14,60	15,40	-13,42	17,50	-18,09
83	13,18	-15,80	14,33	-14,90	19,48	-17,30
84	15,15	-17,39	16,65	-14,70	13,82	-12,07
85	14,21	-14,46	14,20	-15,88	17,11	-15,55
86	18,45	-11,26	17,97	-15,08	14,89	-15,92
87	15,56	-14,54	15,18	-15,24	13,69	-15,27
88	16,06	-14,86	14,45	-13,10	14,50	-13,73
89	17,70	-12,09	17,15	-18,16	14,29	-15,32
90	11,70	-19,05	18,09	-14,93	18,82	-15,45
91	12,27	-13,85	12,87	-13,97	13,22	-19,72
92	15,11	-14,45	15,28	-18,15	15,33	-17,56
93	16,08	-13,07	16,54	-14,72	14,77	-12,06
94	13,93	-16,96	16,68	-18,01	14,35	-14,50
95	13,68	-12,90	15,63	-13,97	14,35	-16,59
96	15,91	-14,82	17,81	-16,34	15,13	-13,19
97	15,72	-16,11	15,51	-16,23	15,31	-12,79
98	15,96	-16,47	15,39	-15,34	14,99	-15,72
99	14,49	-16,98	17,63	-17,38	14,11	-13,99
100	13,94	-12,19	15,71	-14,91	11,64	-17,62
Média	14,90	-14,77	15,62	-15,69	15,17	-15,08

Nas Figuras D.1-D.3 que se seguem apresentam-se os gráficos de barras que indicam, em ordenada, o número de séries temporais cujos valores máximos da velocidade flutuante do vento estão incluídos nos intervalos representados em abcissa.

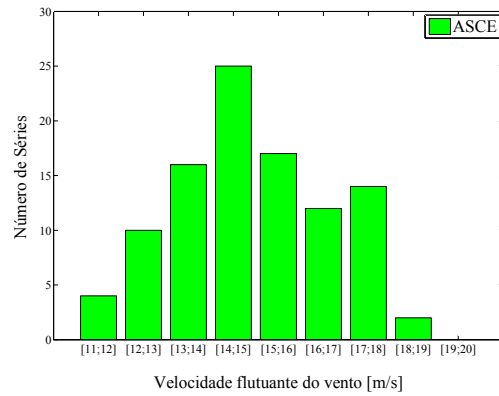


Figura D.1: Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro da ASCE.

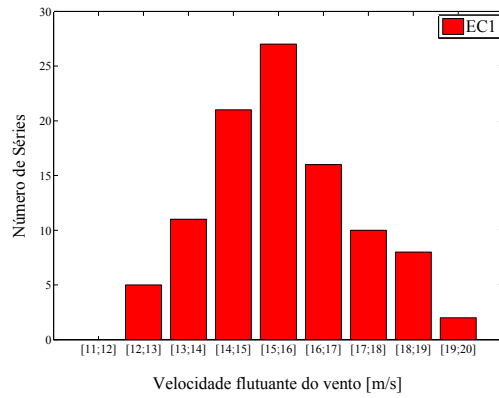


Figura D.2: Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro do EC1.

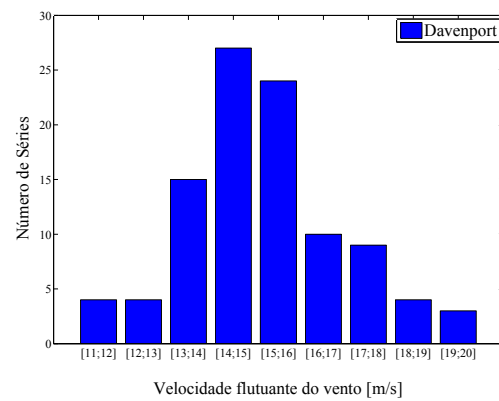


Figura D.3: Amplitudes máximas de $\tilde{v}(t)$ obtidas através do espectro de Davenport.

Anexo E

Análise do Seguidor Solar

Como já foi dito anteriormente, o seguidor solar é constituído por três componentes: grupo coluna, cabeça do seguidor e suporte metálico, sobre o qual assentam os painéis fotovoltaicos. Com o objectivo de elaborar no programa SAP2000[®] o modelo estrutural que melhor permitisse analisar os efeitos da acção do vento sobre o seguidor solar, procurou-se, após a análise da estrutura deste, entender o “caminho” através do qual as forças devidas ao vento são transmitidas dos painéis à fundação da estrutura.

Para identificar os diferentes esforços e deslocamentos na malha metálica atribuiu-se aos nós a nomenclatura apresentada na Figura E.2. Nesta figura, cada um dos perfis C e OM da malha metálica é representado pelo eixo longitudinal que passa pelo centro de gravidade da respectiva secção. Ao nó associado a esforços e deslocamentos iguais foi dada a mesma designação (número). Cada um dos valores assinalados na direcção horizontal corresponde à distância entre os eixos longitudinais que passam pelos centros de gravidade das secções transversais dos correspondentes perfis.

Nas Figuras E.1 e E.2, designa-se de $f.i$ ($i = 1, \dots, 9$) a cada um dos conjuntos de catorze nós dispostos longitudinalmente. Esta nomenclatura foi a utilizada para identificar os deslocamentos nodais na malha metálica e as forças k_1 , k_2 e k_3

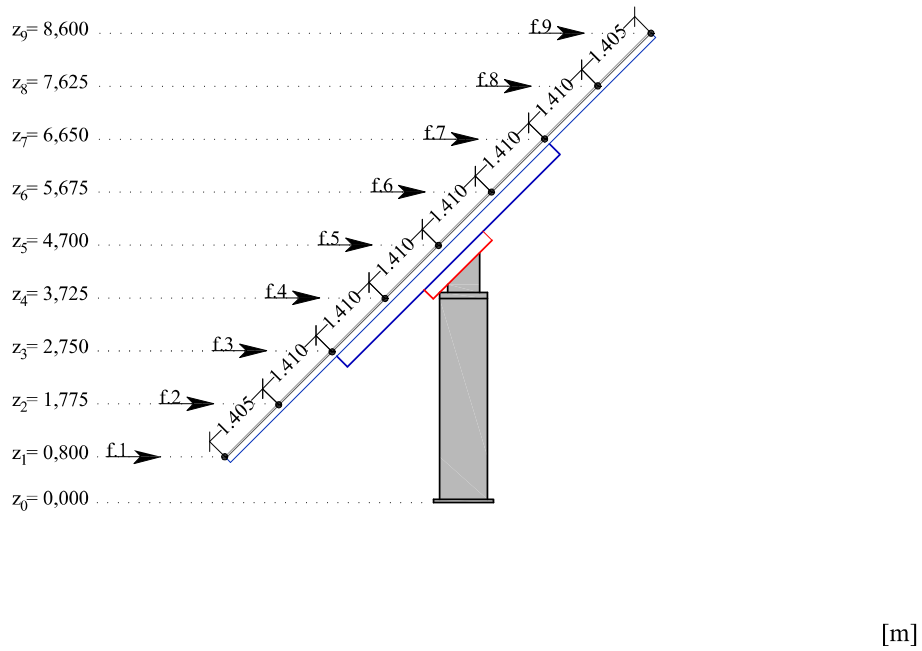


Figura E.1: Nomenclatura atribuída às fileiras f_i ($i= 1,..., 9$) e respectivas alturas z_i .

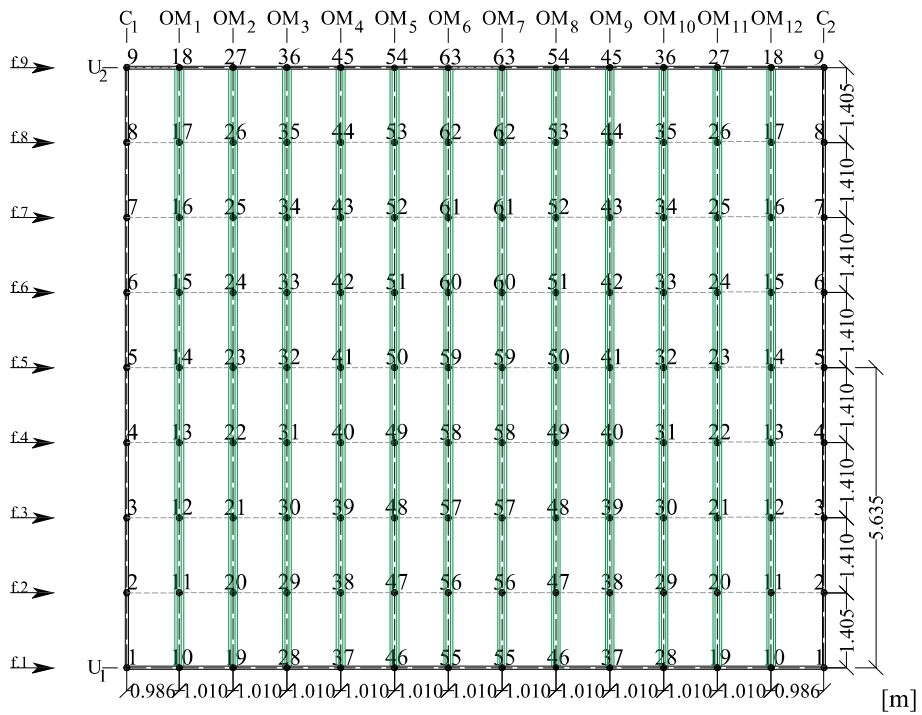


Figura E.2: Nomenclatura atribuída aos nós i da malha metálica.

As forças pontuais sobre os perfis C e OM são “transmitidas” através das ligações L_3 às vigas V1 e V2 (Figura E.3). Estas ligações “ocorrem” nos nós das fileiras f.3 e f.7. Dos nós A e D das vigas V1 e V2, respectivamente, as cargas são “encaminhadas” para as vigas V3. Os nós referidos traduzem as ligações L_2 . Nas vigas V1 e V2 são ainda assinalados os nós adicionais (B e E), localizados nas secções destes elementos estruturais onde ocorrem alguns dos esforços máximos.

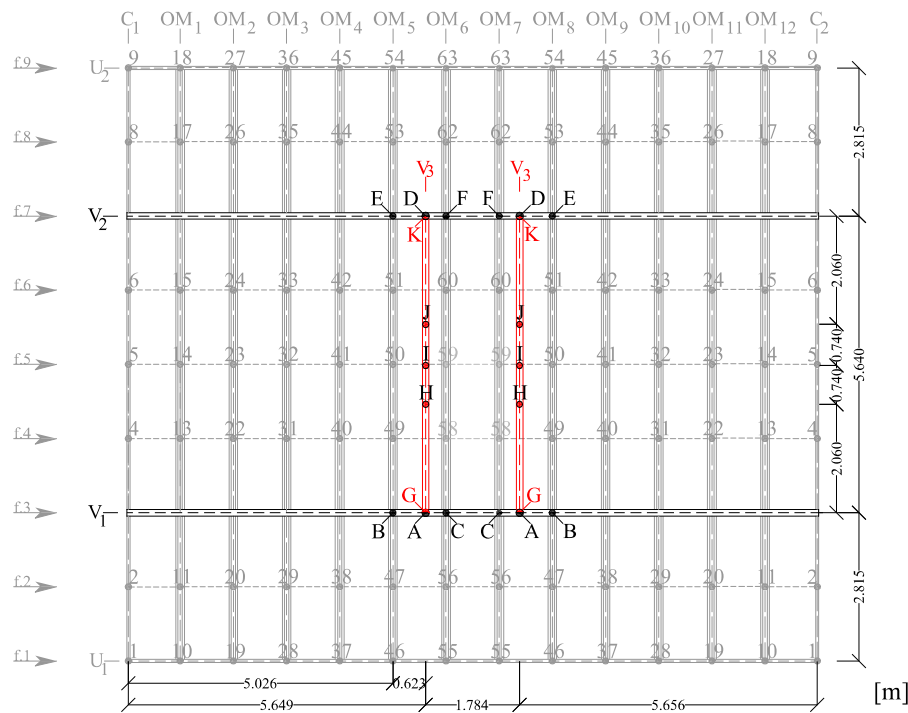


Figura E.3: Nomenclatura atribuída a alguns dos nós das vigas V1 e V2.

Dos nós H, I e J das vigas V3, que correspondem às ligações aparafusadas L_1 , as cargas são transmitidas às cantoneiras da cabeça do seguidor, mais concretamente aos nós L, M e N, assinalados na Figura E.4. Do ponto M das cantoneiras as cargas são transmitidas ao ponto O dos tubos facar e, daqui, são “encaminhadas” até ao nó S da base da coluna grande, de onde descarregam sobre a fundação da estrutura.

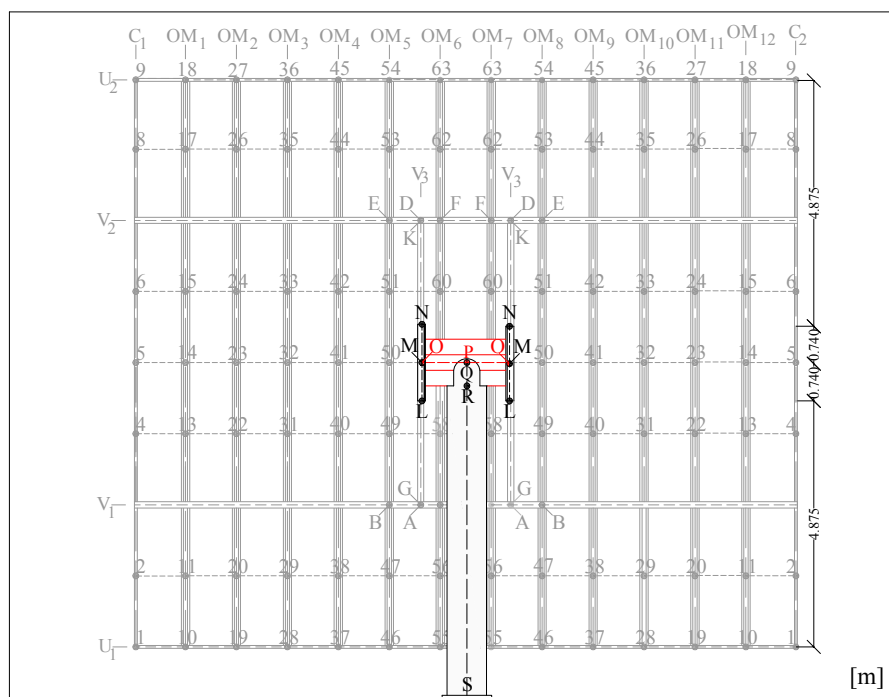


Figura E.4: Nomenclatura atribuída a alguns dos nós da cabeça do seguidor e grupo coluna.

É de notar que as considerações feitas relativamente ao “caminho” das cargas de vento são válidas igualmente para as restantes forças a considerar, nomeadamente, o peso dos painéis e dos elementos estruturais do seguidor.

Anexo F

Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica. Diagramas de Esforços

F.1 Análise Estática

F.1.1 Perfis C_1 e C_2

▷ Combinação [S,A]

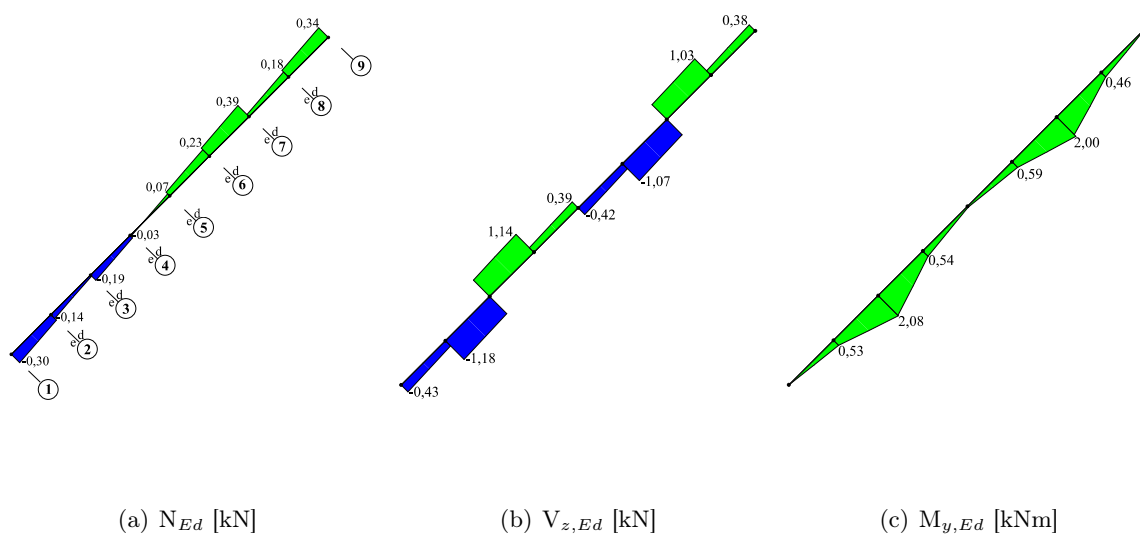


Figura F.1: Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [S,A].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.

Diagramas de Esforços

▷ Combinação [S,B]

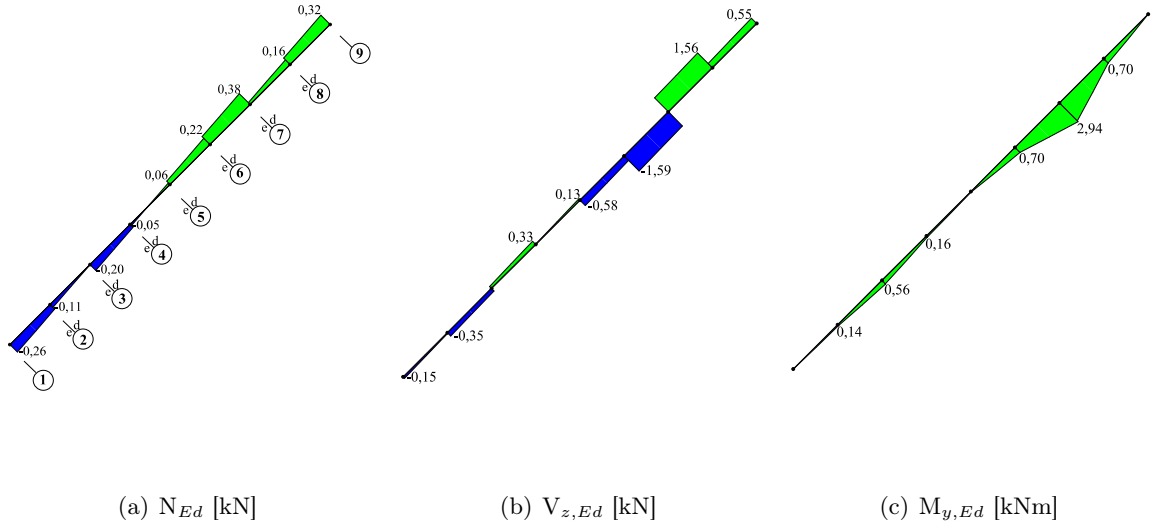


Figura F.2: Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [S,B].

▷ Combinação [P,A]

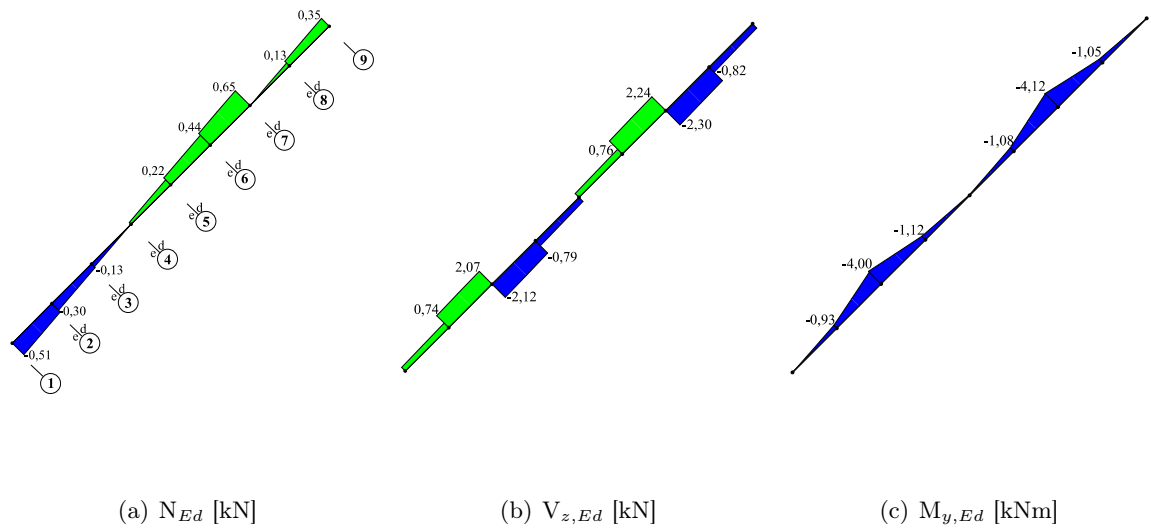


Figura F.3: Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,A].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

▷ Combinação [P,B]

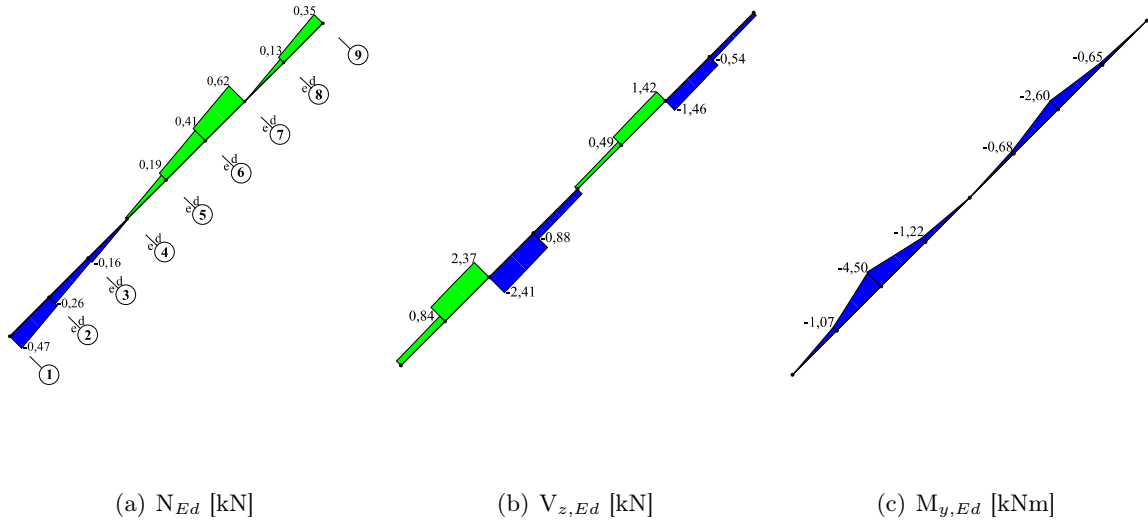


Figura F.4: Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,B].

F.1.2 Perfis OM

F.1.2.1 Perfis OM_1 e OM_{12}

▷ Combinação [S,A]

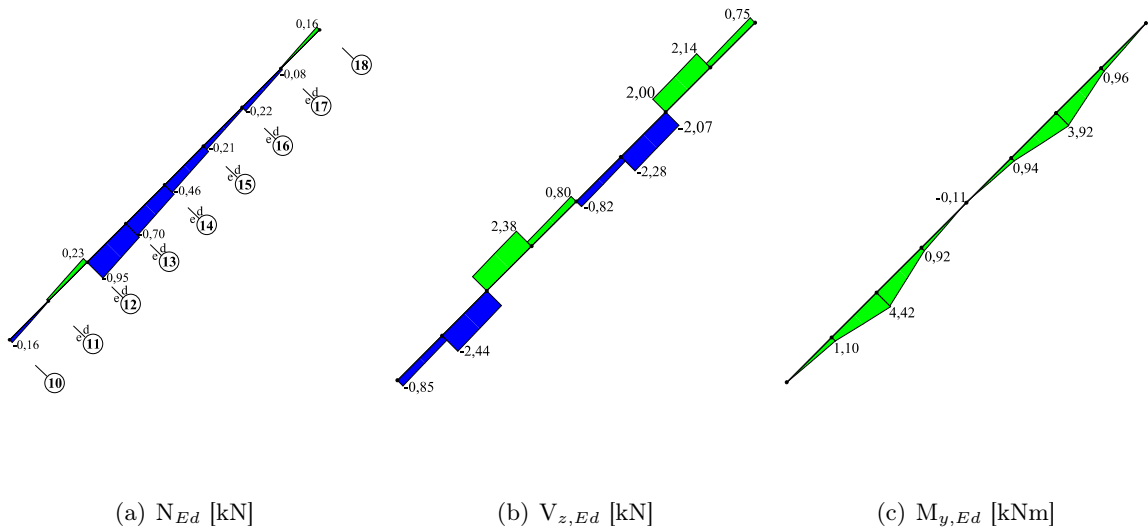


Figura F.5: Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [S,A].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.

Diagramas de Esforços

▷ Combinação [S,B]

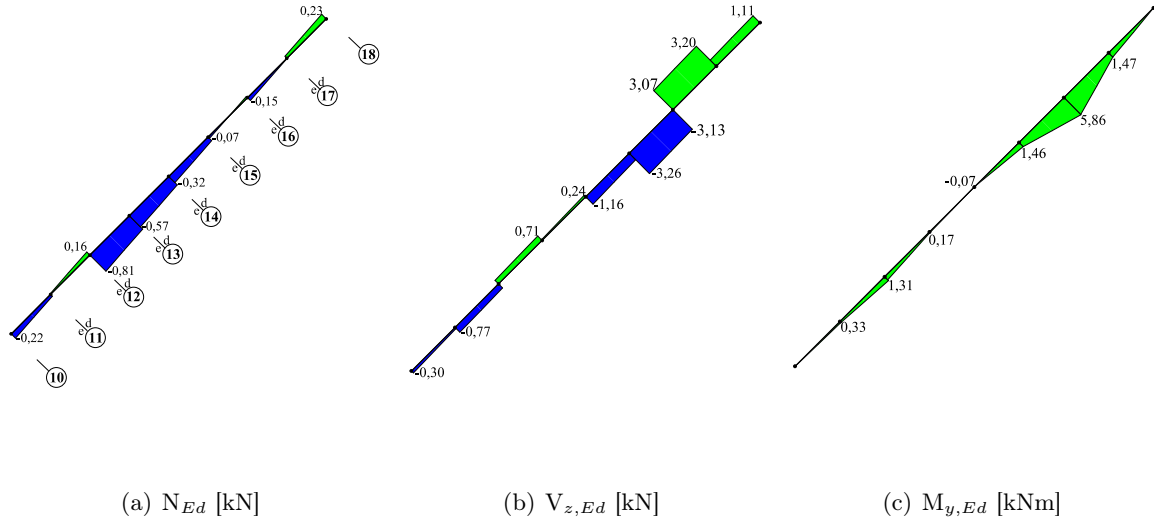


Figura F.6: Diagramas de esforços nos perfis OM₁ e OM₁₂ para a combinação [S,B].

▷ Combinação [P,A]

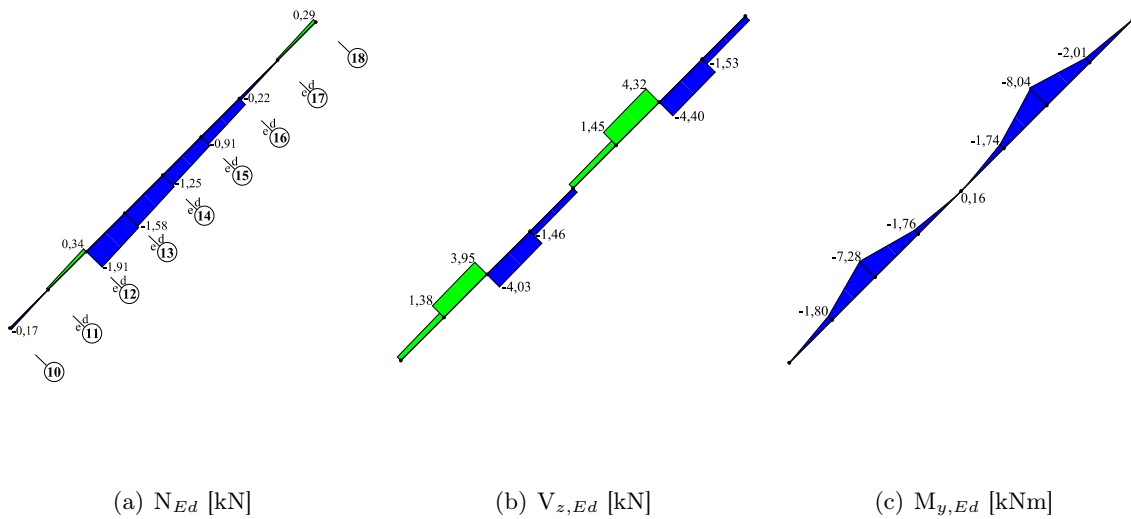


Figura F.7: Diagramas de esforços nos perfis OM₁ e OM₁₂ para a combinação [P,A].

▷ Combinação [P,B]

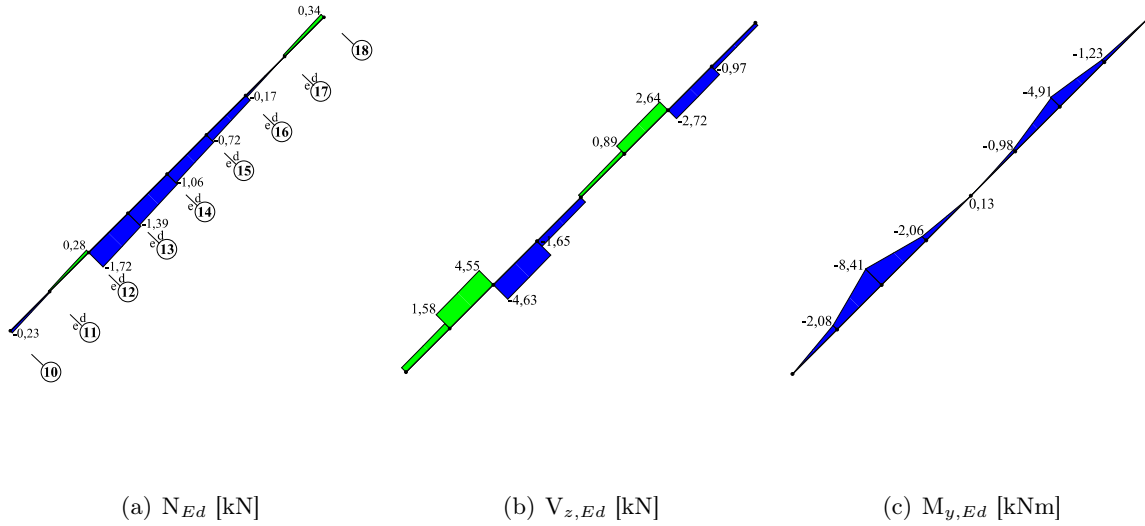


Figura F.8: Diagramas de esforços nos perfis OM₁ e OM₁₂ para a combinação [P,B].

F.1.2.2 Esforço axial, N_{Ed} , nos perfis OM₆ e OM₇

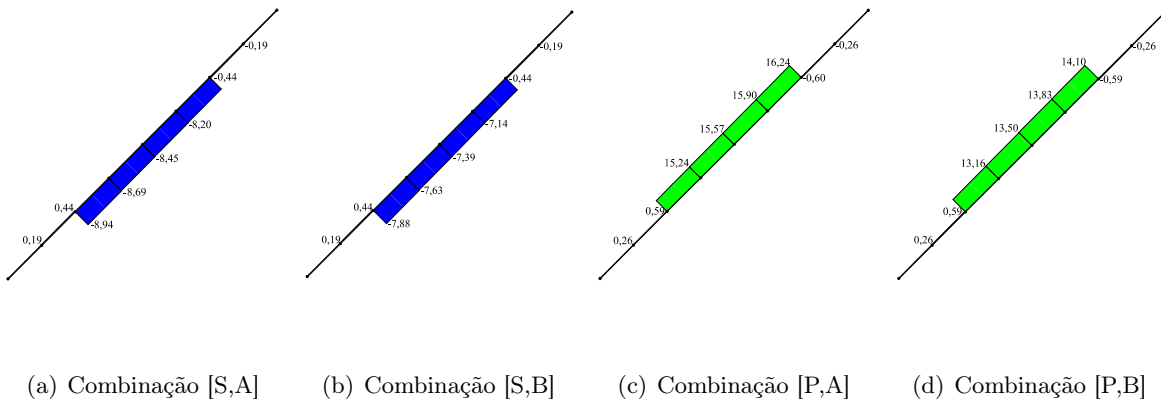


Figura F.9: Diagrama de esforço axial, N_{Ed} [kN], nos perfis OM₆ e OM₇ para as quatro combinações.

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

F.1.3 Viga V1

▷ Combinação [S,A]

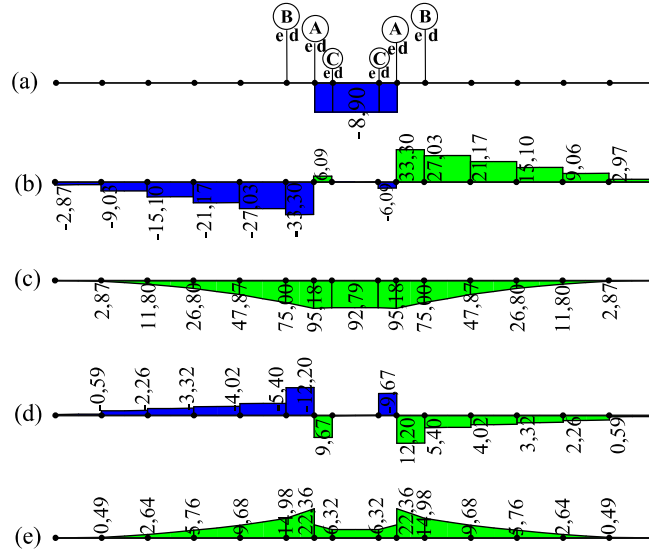


Figura F.10: Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [S,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

▷ Combinação [S,B]

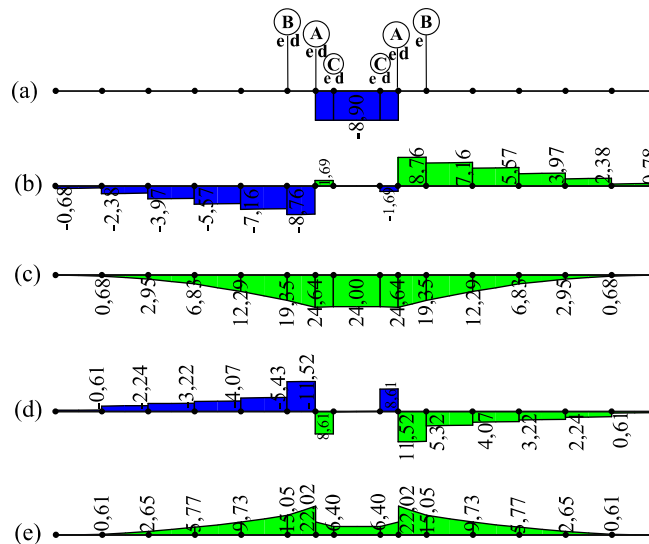


Figura F.11: Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [S,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

▷ Combinação [P,A]

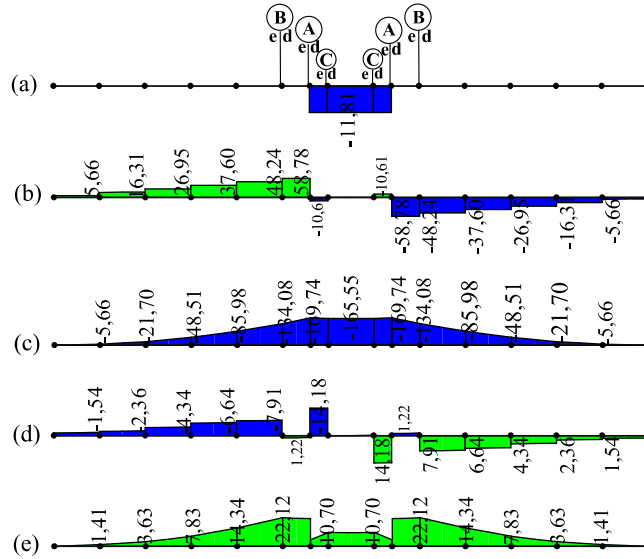


Figura F.12: Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

▷ Combinação [P,B]

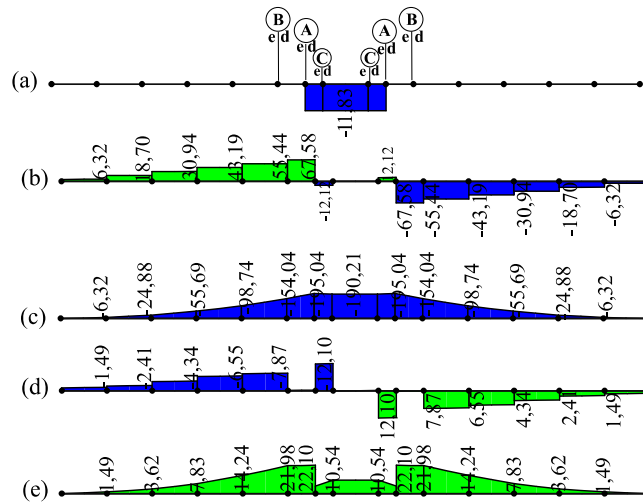
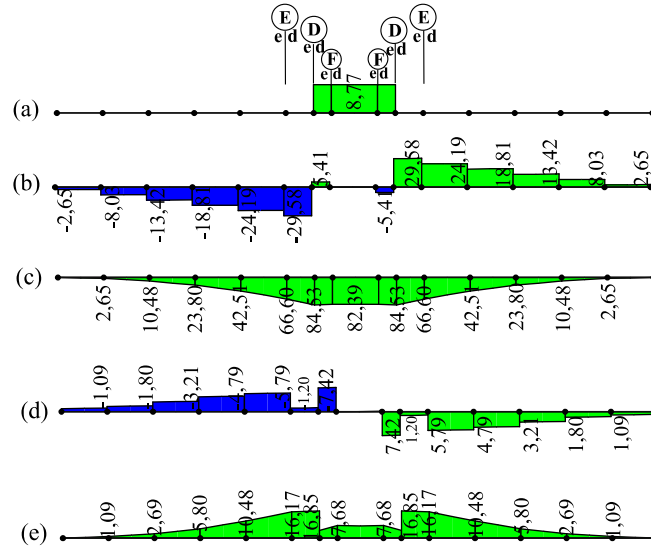


Figura F.13: Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

F.1.4 Viga V2

▷ Combinação [S,A]



Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

▷ Combinação [P,A]

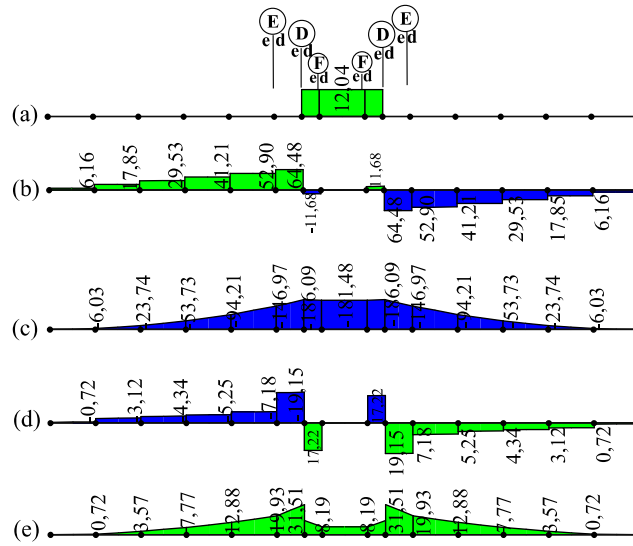


Figura F.16: Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

▷ Combinação [P,B]

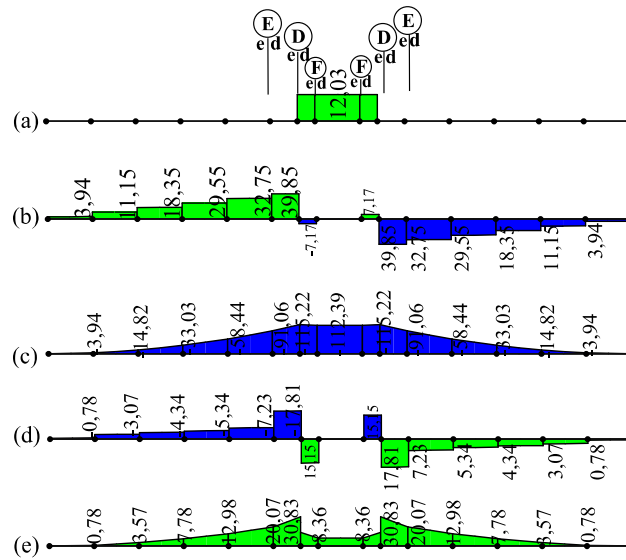


Figura F.17: Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

F.1.5 Vigas V3
▷ Combinação [S,A]

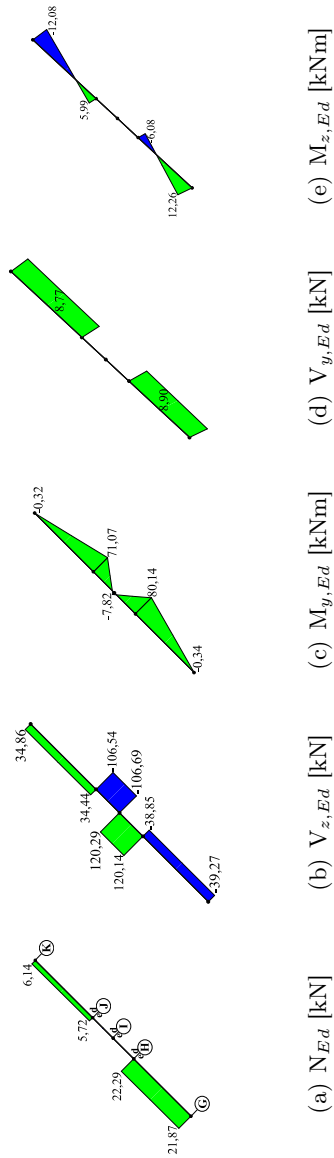


Figura F.18: Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [S,A].

▷ Combinação [S,B]

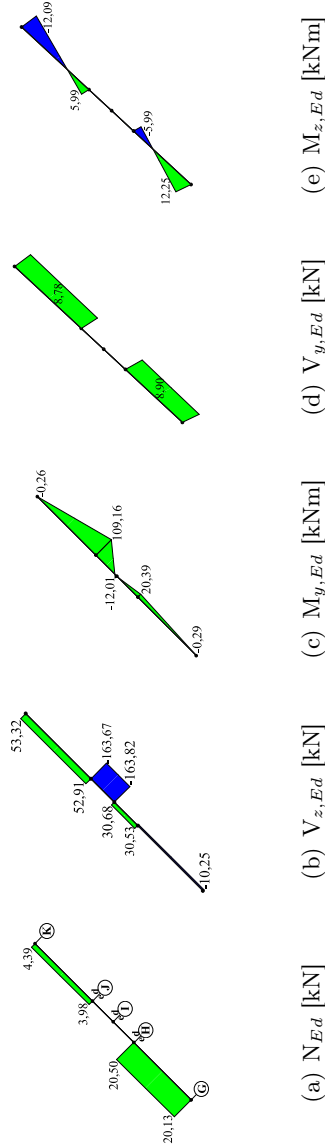


Figura F.19: Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [S,B].

▷ Combinação [P,A]

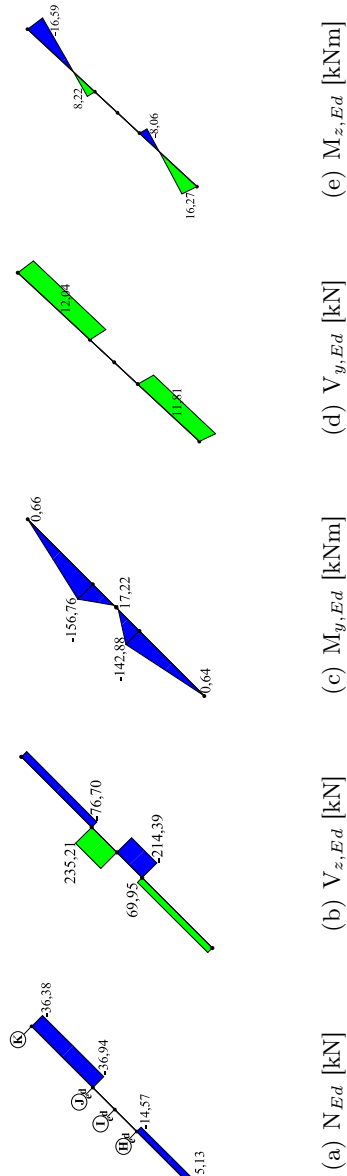


Figura F.20: Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,A].

▷ Combinação [P,B]

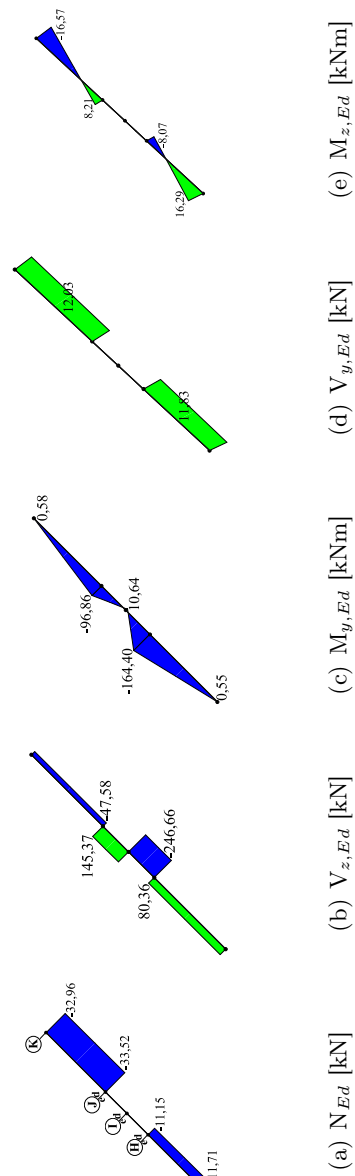


Figura F.21: Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,B].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.

Diagramas de Esforços

F.1.6 Tubos facar

▷ Combinação [S,A]

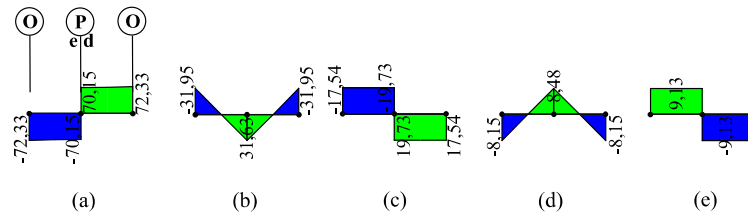


Figura F.22: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,A]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

▷ Combinação [S,B]

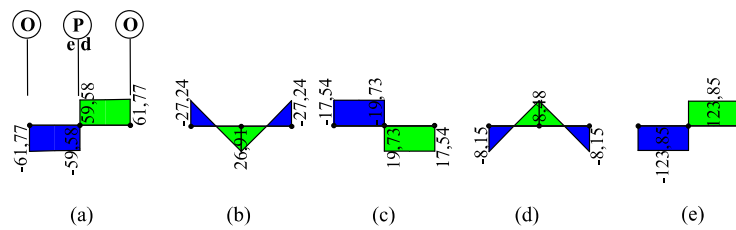


Figura F.23: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,B]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

▷ Combinação [P,A]

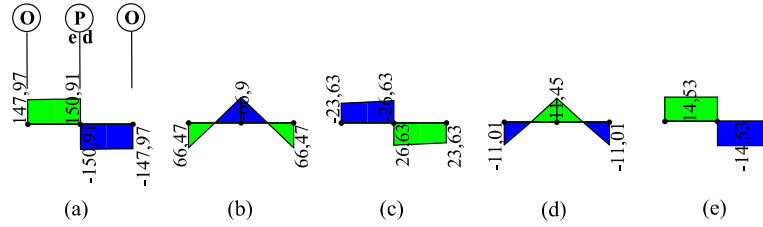


Figura F.24: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,A]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

▷ Combinação [P,B]

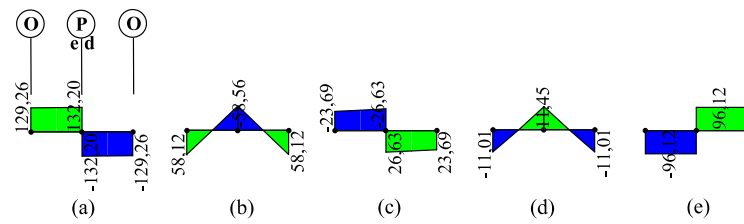


Figura F.25: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,B]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

F.1.7 Colunas grande e pequena

▷ Combinação [S,A]

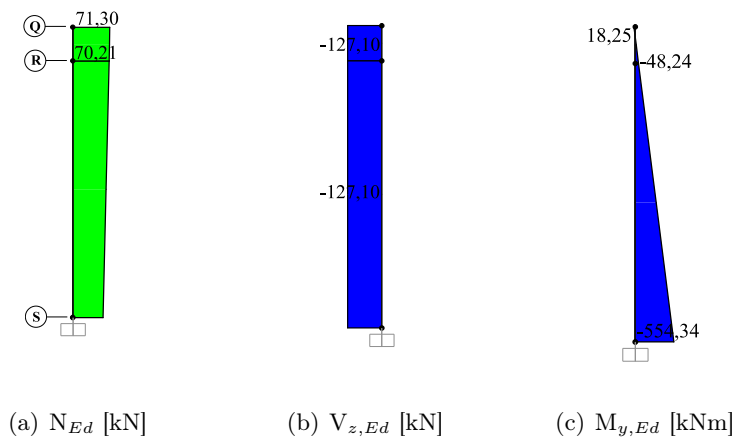


Figura F.26: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,A].

▷ Combinação [S,B]

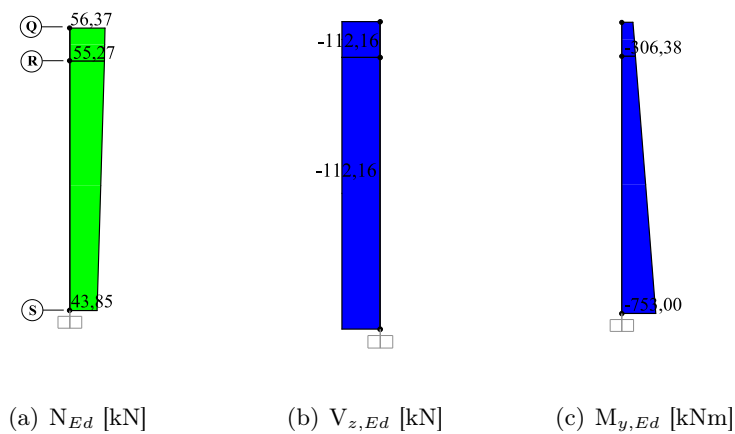


Figura F.27: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,B].

▷ Combinação [P,A]

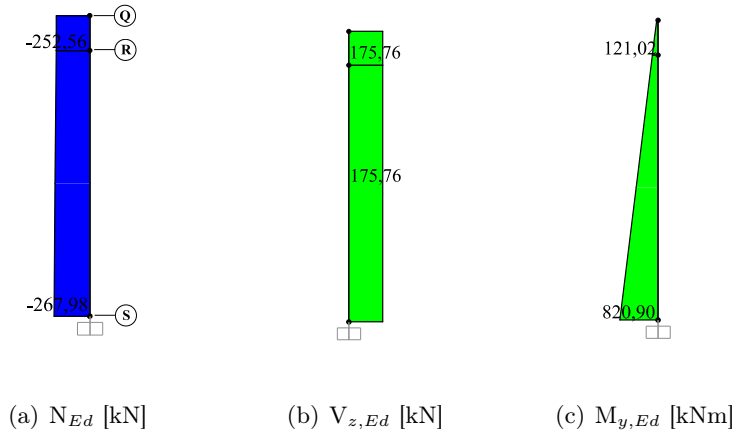


Figura F.28: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,A].

▷ Combinação [P,B]

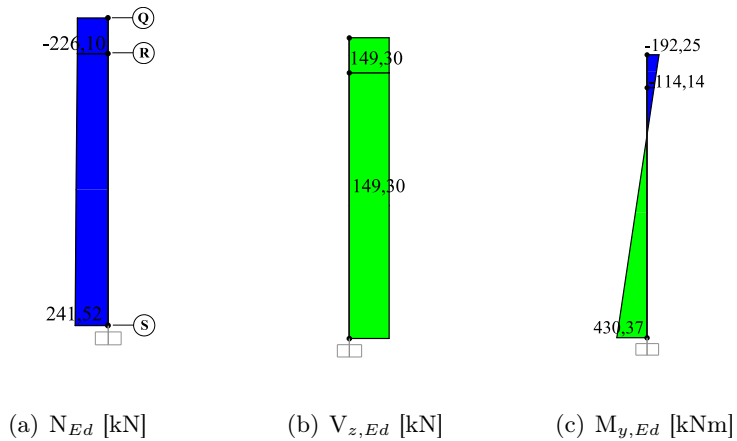


Figura F.29: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,B].

F.2 Análise dinâmica

F.2.1 Perfis C_1 e C_2

► Combinação [P,B]

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.

Diagramas de Esforços

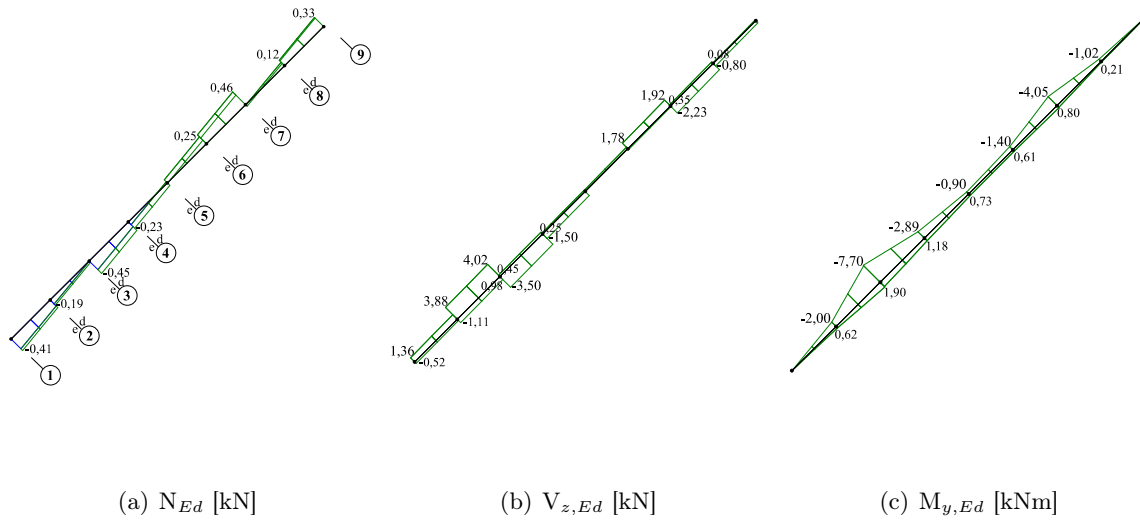


Figura F.30: Diagramas de esforços nos perfis C_1 e C_2 para a combinação [P,B].

F.2.2 Perfis OM

F.2.2.1 Perfis OM_1 e OM_{12}

► Combinação [S,B]

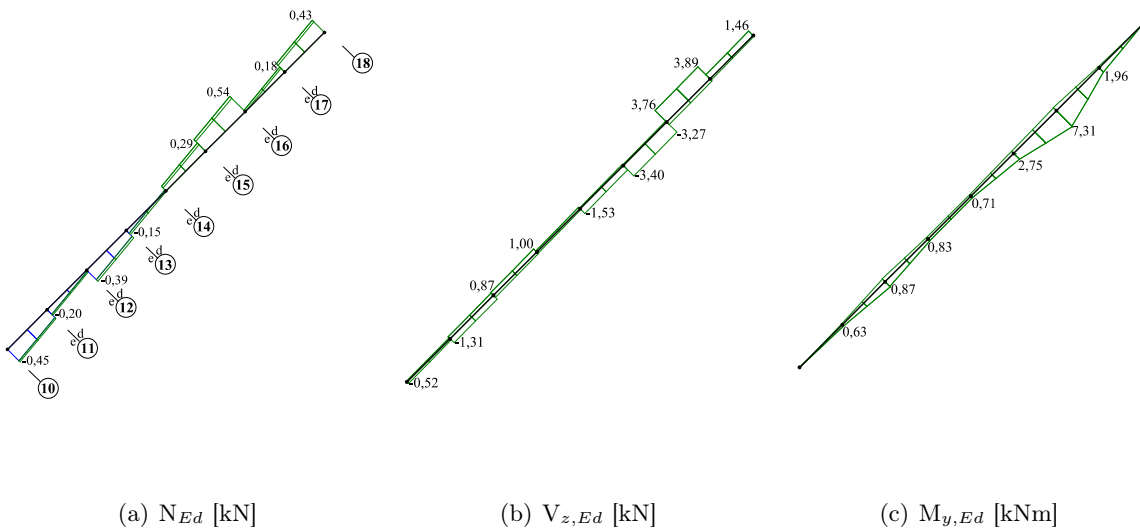


Figura F.31: Diagramas de esforços nos perfis OM_1 e OM_{12} para a combinação [S,B].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.
Diagramas de Esforços

► **Combinação [P,B]**

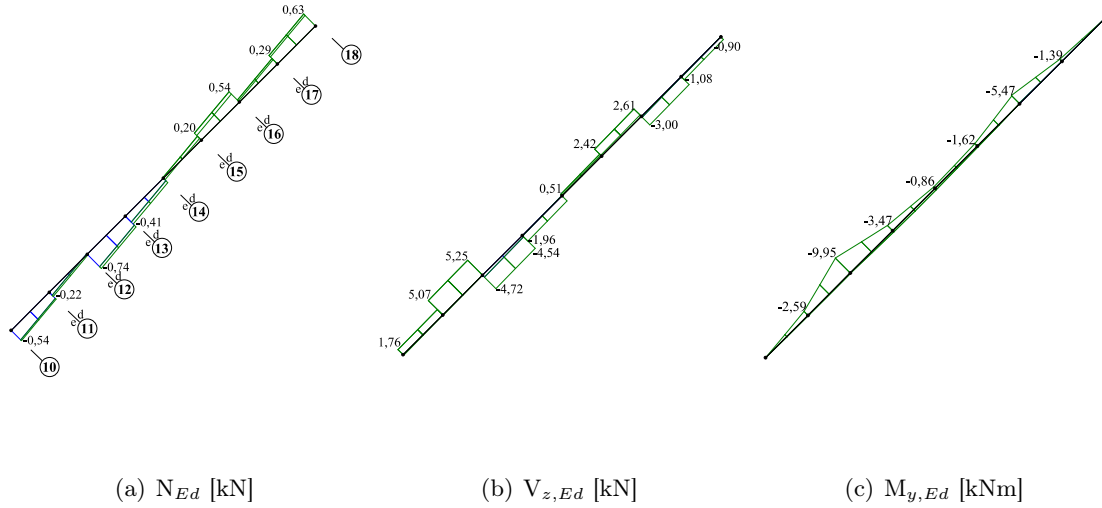


Figura F.32: Diagramas de esforços nos perfis OM₁ e OM₁₂ para a combinação [P,B].

F.2.2.2 Esforço axial N_{Ed} nos perfis OM₆ e OM₇

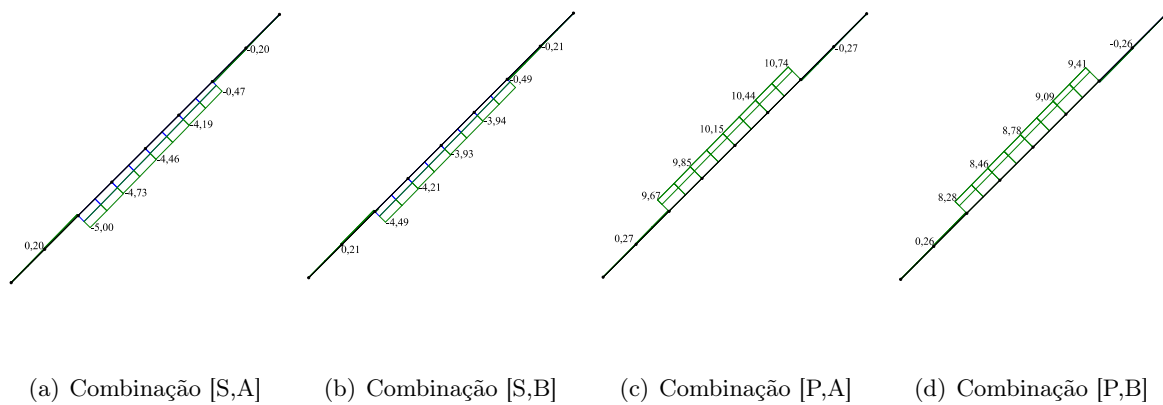


Figura F.33: Diagrama de esforço axial, N_{Ed} [kN], nos perfis OM₆ e OM₇ para as quatro combinações.

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica. Diagramas de Esforços

F.2.2.3 Viga V1

► Combinação [P,B]

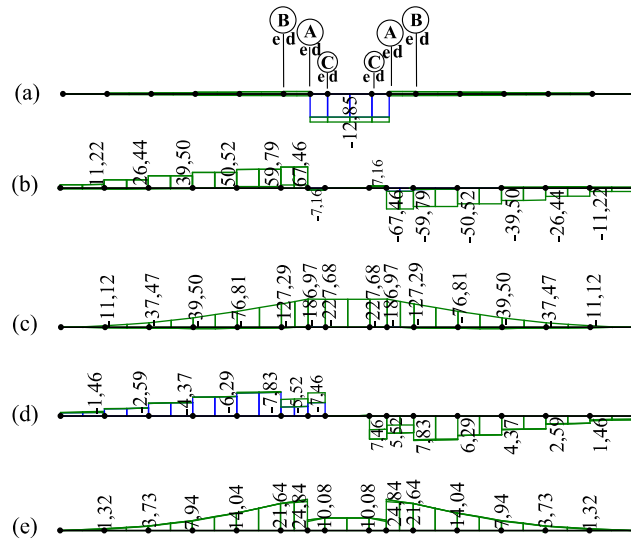


Figura F.34: Diagramas de esforços na viga V1 para a combinação [P,B]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

F.2.2.4 Viga V2

► Combinação [P,A]

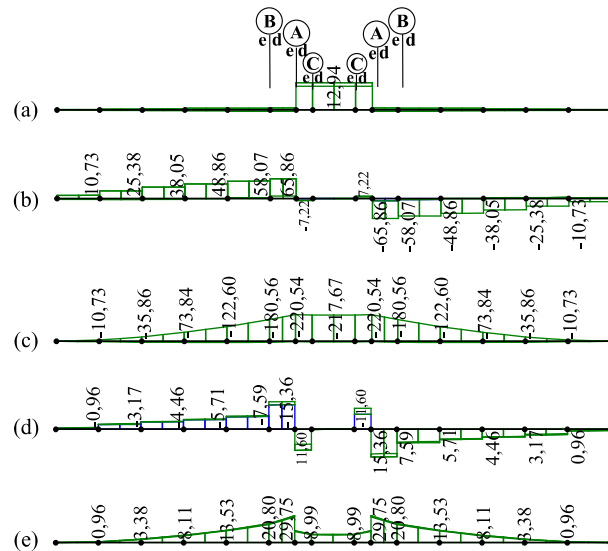


Figura F.35: Diagramas de esforços na viga V2 para a combinação [P,A]: (a) N_{Ed} [kN] (b) $V_{z,Ed}$ [kN] (c) $M_{y,Ed}$ [kNm] (d) $V_{y,Ed}$ [kN] (e) $M_{z,Ed}$ [kNm].

F.2.2.5 Viga V3

► Combinação [P,B]

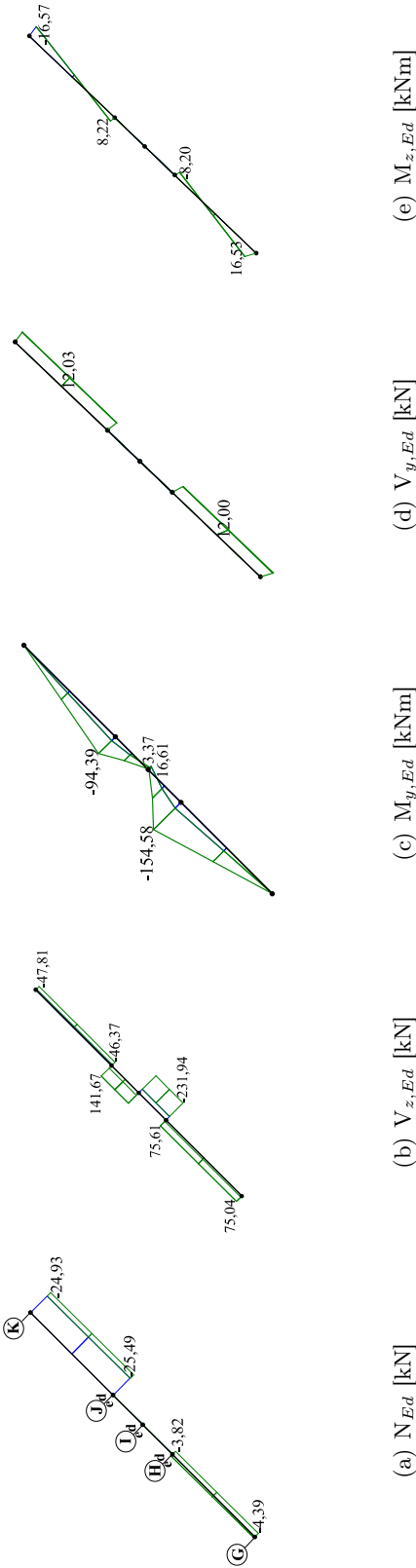


Figura F.36: Diagramas de esforços nas vigas V3 para a combinação [P,B].

Anexo F. Resultados obtidos através das Análises Estática e Dinâmica.

Diagramas de Esforços

F.2.2.6 Tubos facar

► Combinação [S,B]

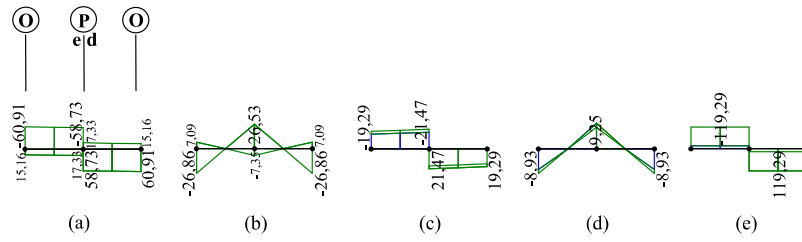


Figura F.37: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [S,B]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

► Combinação [P,A]

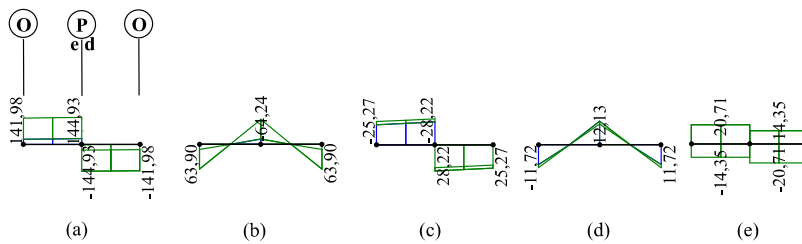


Figura F.38: Diagramas de esforços nos TF para a combinação [P,A]: (a) $V_{z,Ed}$ [kN] (b) $M_{y,Ed}$ [kNm] (c) $V_{y,Ed}$ [kN] (d) $M_{z,Ed}$ [kNm] (e) T_{Ed} [kNm].

F.2.2.7 Colunas grande e pequena

► Combinação [S,B]

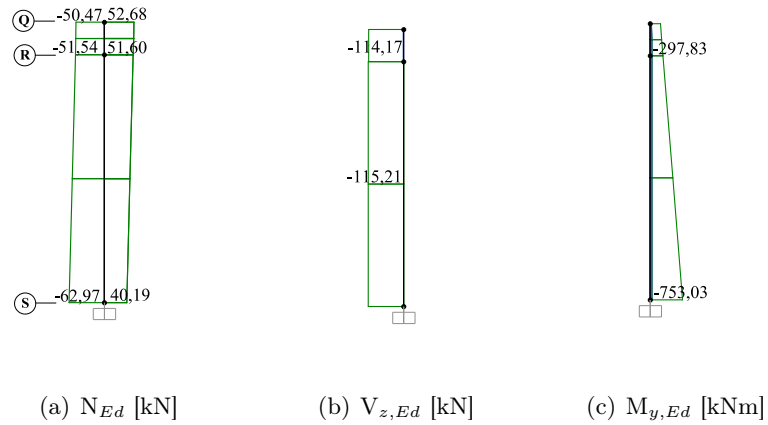


Figura F.39: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [S,B].

► Combinação [P,A]

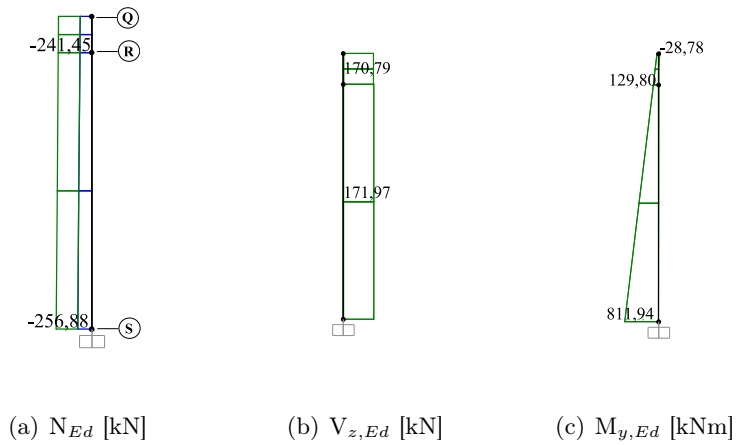


Figura F.40: Diagramas de esforços nas CG e CP para a combinação [P,A].

Anexo G

Disposições Gerais do Eurocódigo 3, Parte 1:1 e Parte 1:8

A norma europeia EN 1993: *Projecto de estruturas de Aço*, usualmente designada de Eurocódigo 3 (EC3), é o principal documento que regulamenta a actividade de projecto de estruturas metálicas a nível nacional. A norma EN 1993 está dividida em seis partes de que se destaca a Parte 1 (EC3-1), a qual inclui as regras e disposições aplicáveis a estruturas de edifícios e outras estruturas metálicas. A Parte 1 está ainda subdividida em doze sub-partes, das quais só a primeira, *Regras gerais e regras para edifícios* (EC3-1-1) [58], e oitava, *Ligações* (EC3-1-8) [59], têm interesse para o presente trabalho.

G.1 Disposições do Eurocódigo 3, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

G.1.1 Resistência das secções transversais

Para aplicar as disposições do EC1-1-1 é necessário atribuir uma classificação às secções transversais. Esta classificação traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciadas por fenómenos de encurvadura local. Segundo o EC3-1-1 [58], as secções transversais são classificadas em classes 1 e 2 do modo indicado:

- **Classe 1.** Secções em que se pode formar uma rótula plástica, com uma capacidade de rotação superior à mínima exigida para a utilização de métodos plásticos de análise.

Anexo G. Disposições Gerais do Eurocódigo 3, Parte 1:1 e Parte 1:8

- **Classe 2.** Secções em que é possível atingir o momento plástico, mas que possuem uma capacidade de rotação limitada.

A classificação de uma secção é efectuada com base no valor da razão entre o comprimento e a espessura (c/t) da alma e banzo, total ou parcialmente comprimidos, nos esforços actuantes na secção (esforço axial e momento flector) e na classe do aço. As relações c/t dos elementos comprimidos da maioria das secções correntes encontram-se nas Figuras G.1, G.2 e G.3 apresentadas no Anexo G. A classe do aço é tida em conta através do parâmetro $\epsilon = \sqrt{235/f_y}$, sendo f_y a tensão de cedência do aço. Cada elemento da mesma secção, alma e banzo, pode ser caracterizado por classes distintas. Em geral, a classe da secção é dada pela maior das classes (mais desfavorável).

Componentes internos comprimidos							
				Eixo de flexão			
				Eixo de flexão			
Classe	Componente solicitada à flexão		Componente solicitada à compressão		Componente solicitada à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
1	$c/t \leq 72\varepsilon$		$c/t \leq 33\varepsilon$		quando $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha_c - 1}$ quando $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha_c}$		
2	$c/t \leq 83\varepsilon$		$c/t \leq 38\varepsilon$		quando $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha_c - 1}$ quando $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha_c}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
3	$c/t \leq 124\varepsilon$		$c/t \leq 42\varepsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\varepsilon (1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

*) $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$ ou quando a extensão de tracção $\epsilon_y > f_y/E$

Figura G.1: Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58].

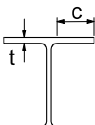
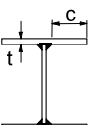
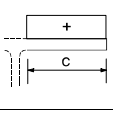
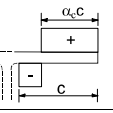
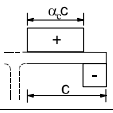
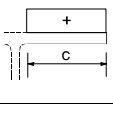
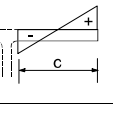
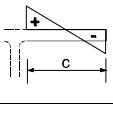
Banzos em consola						
						
Secções laminadas			Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha_c}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha_c}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon \sqrt{k_\sigma}$				
Para k_σ ver EN 1993-1-5						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura G.2: Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58].

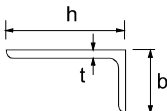
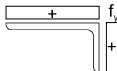
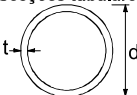
Cantoneiras						
	Não se aplica a cantoneiras em contacto contínuo com outros componentes					
Consultar também “Banzos em consola” (ver folha 2 de 3)						
Classe	Secção comprimida					
Distribuição das tensões na secção (compressão positiva)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon$; $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
Secções tubulares						
						
Classe	Secção em flexão e/ou compressão					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$					
NOTA Para $d/t > 90\varepsilon^2$ ver EN 1993-1-6.						
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Figura G.3: Limites máximos das relações largura-espessura para paredes comprimidas [58].

A verificação da resistência das secções transversais quando submetidas aos esforços de tracção, $N_{t,Ed}$, compressão, $N_{c,Ed}$, transversos, $V_{y,Ed}$ e $V_{z,Ed}$, momentos flectores $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$,

e torsor, T_{Ed} , actuando isoladamente ou combinados, devem respeitar as disposições dos parágrafos G.1.1.1-G.1.1.8.

As características geométricas das secções transversais, necessárias aos cálculos de verificação da capacidade resistente dessas secções, são: a área total da secção ou secção bruta A , área resistente ao esforço transversal segundo as direcções z e y , $A_{v,z}$ e $A_{v,y}$, módulos elásticos de flexão da secção segundo os eixos $y - y$ e $z - z$, $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$, respectivamente e, módulos plásticos de flexão, $W_{pl,y}$ e $W_{pl,z}$, segundo os referidos eixos.

Os valores recomendados no EC3-1-1 para os coeficientes parciais de segurança são os seguintes: $^1\gamma_{M0} = 1,00$ e $^2\gamma_{M1} = 1,00$.

G.1.1.1 Esforço axial de tracção

A segurança de um elemento metálico solicitado exclusivamente por um esforço axial de tracção, $N_{t,Ed}$, é garantida se respeitar a condição

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (G.1)$$

em que $N_{t,Rd}$ é o valor do esforço axial resistente. Para secções de classe 1 e 2, $N_{t,Rd}$ é igual ao esforço normal plástico resistente da secção, $N_{pl,Rd}$, dado pela relação

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (G.2)$$

G.1.1.2 Esforço axial de compressão

O valor do esforço axial de compressão actuante, $N_{c,Ed}$, em cada secção transversal, deve obedecer à relação

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (G.3)$$

em que $N_{c,Rd}$ é o valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme que, para secções transversais de classe 1 e 2, é dado pela equação

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (G.4)$$

¹ γ_{M0} - Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe.

² γ_{M1} - Coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento.

G.1.1.3 Momento flector

O momento flector de dimensionamento, M_{Ed} , em relação a cada eixo principal (y-y e/ou z-z), deve satisfazer a condição G.5 e/ou G.6. O valor de cálculo do momento flector resistente $M_{c,Rd}$, para secções de classes 1 e 2, é igual ao momento plástico resistente, $M_{pl,Rd}$.

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad \text{em que} \quad M_{c,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{G.5})$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad \text{em que} \quad M_{c,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{G.6})$$

G.1.1.4 Esforço transversal

Segundo o EC3-1-1, o valor de cálculo do esforço transversal segundo as direcções y e z , $V_{y,Ed}$ e $V_{z,Ed}$, e do esforço transversal resistente $V_{c,Rd}$, devem verificar, em cada secção, as relações

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad \text{sendo} \quad V_{c,Rd} = V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (\text{G.7})$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad \text{sendo} \quad V_{c,Rd} = V_{pl,y,Rd} = \frac{A_{v,y} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (\text{G.8})$$

A grandeza $V_{c,Rd}$, para secções de classe 1 e 2, na ausência de torção, representa o esforço transversal plástico resistente, $V_{pl,Rd}$.

Complementarmente, no caso de almas sem reforço intermédio, segundo a cláusula 6.2.6(6) do EC3-1-1, deve ser verificada a resistência à encurvadura da alma por esforço transversal se fôr satisfeita a condição

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\epsilon}{\eta} \quad (\text{G.9})$$

Na relação anterior, h_w e t_w representam, respectivamente, a altura e espessura da alma, e ϵ é o parâmetro dado por $\sqrt{235/f_y}$; η , de forma conservativa, é igual a 1,0.

G.1.1.5 Torção

Segundo a cláusula 6.2.7 do EC3-1-1, o dimensionamento de elementos estruturais submetidos a esforço de torção deve respeitar a relação

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{G.10})$$

em que T_{Ed} é o momento torsor total actuante na secção transversal e T_{Rd} é o valor de cálculo do momento torsor resistente na referida secção. Para secções submetidas a torção não uniforme, o momento torsor actuante, T_{Ed} , deverá ser igual à soma das seguintes componentes: $T_{t,Ed}$, valor de cálculo da componente de torção uniforme ou torção de St. Venant e $T_{w,Ed}$, valor de cálculo da componente de torção não uniforme devida à restrição ao empenamento.

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} \quad (G.11)$$

Em secções fechadas de parede fina, a componente de torção uniforme é preponderante e, por conseguinte, é usual desprezar a componente de torção provocada pelo impedimento ao empenamento, $T_{w,Ed}$. Neste caso, considera-se que o momento torsor aplicado é totalmente resistido pela componente de torção uniforme ou torção de St. Venant, ou seja, $T_{Ed} = T_{t,Ed}$.

As tensões tangenciais actuantes devidas à torção uniforme ou torção de St. Venant, $\tau_{t,Ed}$, conforme a forma da secção, são obtidas por diferentes teorias. No caso particular de secções fechadas de paredes finas (como secções rectangulares ocas) aplica-se a teoria de Bredt, segundo a qual as tensões variam ao longo da secção, em função da espessura desta [63]. Neste caso, a tensão tangencial devido à torção uniforme, $\tau_{t,Ed}$, é dada pela expressão

$$\tau_{t,Ed} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_m \cdot t} \quad (G.12)$$

em que A_m representa a área limitada pela linha média da espessura de uma secção fechada de paredes finas, representada na Figura G.4, e t a espessura num ponto da secção.

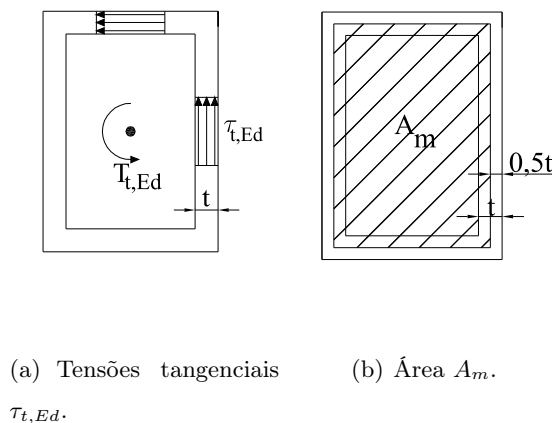


Figura G.4: Tensões tangenciais devidas à torção uniforme e área A_m limitada pela linha média da espessura da secção fechada.

Na verificação de secções tubulares ocas, considerando a interacção plástica de esforços, utilizam-se os procedimentos estabelecidos nas cláusulas 6.2.7 e 6.2.8 do EC3-1-1. Seguindo esta via, na verificação da segurança de secções submetidas a esforço transversal V_{Ed} e a momento torsor T_{Ed} , o valor de cálculo do esforço transversal plástico resistente, $V_{pl,Rd}$, deverá ser reduzido para $V_{pl,T,Rd}$. Nestas circunstâncias, o valor de cálculo do esforço transversal actuante deve satisfazer a relação

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{G.13})$$

em que $V_{pl,T,Rd}$ é o valor do esforço transversal plástico resistente reduzido devido à presença de momento torsor. Para secções tubulares é dado por

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd} \quad (\text{G.14})$$

Se o esforço transversal actuante, V_{Ed} , for inferior a metade do esforço transversal plástico resistente reduzido devido à presença de momento torsor, $V_{pl,T,Rd}$ (relação G.14) não é necessário reduzir o momento plástico resistente devido à presença do esforço transversal e do momento torsor.

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,T,Rd} \quad (\text{G.15})$$

G.1.1.6 Interacção momento flector - esforço transversal

Numa secção submetida a flexão e esforço transversal, o momento flector resistente deve ser reduzido em função do valor do esforço transversal.

Quando o esforço transversal actuante, V_{Ed} , excede metade do esforço transversal plástico resistente, $V_{pl,Rd}$, (relação G.15) é necessário considerar o seu efeito sobre o momento flector resistente, $M_{V,Rd}$. Nesta condição, o momento flector plástico é reduzido para ter em conta o efeito do esforço transversal adoptando-se, na área resistente ao esforço transversal, uma tensão de cedência reduzida igual a $(1-\rho_v) \cdot f_y$, com ρ_v dado pela equação G.17.

$$V_{Ed} \geq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \quad \text{então} \quad M_{Rd} = M_{V,Rd} \quad (\text{G.16})$$

$$\rho_v = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (\text{G.17})$$

No caso de secções transversais em I, de classes 1 e 2, com banzos iguais, flectidas em relação ao eixo de maior inércia (y-y), o valor de cálculo do momento flector plástico resistente reduzido para ter em conta o esforço transversal, $M_{y,V,Rd}$, pode ser calculado através da expressão

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho_v \cdot A_w^2}{4 \cdot t_w} \right] \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{com } A_w = h_w \cdot t_w \quad (\text{G.18})$$

Segundo o eixo de menor inércia (z-z), o valor de cálculo do momento flector plástico resistente $M_{z,V,Rd}$ é dado pela equação [61].

$$M_{z,V,Rd} = (1 - \rho_y) \cdot M_{pl,z,Rd} \quad (\text{G.19})$$

G.1.1.7 Flexão composta: interacção momento flector - esforço axial

Na presença de esforço normal, o efeito deste sobre o momento flector plástico resistente deverá ser tomado em consideração. Para secções transversais de classe 1 e 2, deve ser satisfeito o critério

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad \text{mas } M_{N,Rd} \leq M_{pl,Rd} \quad (\text{G.20})$$

em que $M_{N,Rd}$ representa o valor de cálculo do momento flector plástico resistente reduzido pelo esforço normal, N_{Ed} .

Em secções duplamente simétricas, por exemplo, secções em I, não é necessário ter em conta o efeito do esforço normal no cálculo do momento flector plástico resistente segundo o eixo de maior inércia (eixo y-y), sempre que se verifiquem as condições

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} \quad (\text{G.21})$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{G.22})$$

Para secções em I duplamente simétricas, não é necessário ter em consideração o efeito do esforço normal sobre o momento plástico resistente em relação ao eixo z-z, se se verificar a condição

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{G.23})$$

Para secções tubulares circulares comerciais, $M_{N,Rd}$ pode ser dado pela expressão [61]

$$M_{N,Rd} = 1,04 \cdot M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1,7}) \quad (G.24)$$

com

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (G.25)$$

G.1.1.8 Flexão desviada

De acordo com a cláusula 6.2.9(6) do EC3-1-1 [58], a segurança em relação à flexão segundo duas direcções, flexão desviada, para secções transversais de classe 1 e 2, pode ser verificada através de fórmulas de interacção plástica. No caso de flexão desviada deve ser verificado o critério

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^{\beta_d} \leq 1 \quad (G.26)$$

em que as grandezas α_d e β_d assumem os seguintes valores consoante o tipo de secção: para secções em I, $\alpha_d = 2$ e $\beta_d = 5 \cdot n$ ($\beta_d \geq 1$), e para secções rectangulares ocas, $\alpha_d = \beta_d = 1,66/1 - 1,13 \cdot n^2$.

Se não for necessário ter em conta o efeito do esforço normal no cálculo do momento flector plástico resistente, a verificação à flexão desviada é dada pela equação G.27.

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right]^{\alpha_d} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \right]^{\beta_d} \leq 1 \quad (G.27)$$

G.1.2 Resistência dos elementos estruturais à encurvadura

A encurvadura é um fenómeno de instabilidade que se caracteriza pela ocorrência de grandes deformações transversais em elementos sujeitos a esforços de compressão. De acordo com EC3-1-1, secções transversais de elementos axialmente comprimidos devem ser verificadas à encurvadura através da relação

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (G.28)$$

em que N_{Ed} é o valor de cálculo do esforço axial de compressão e $N_{b,Rd}$ a resistência à encurvadura devida à compressão por modo de flexão (designada de um modo simplificado de encurvadura por flexão). O valor de cálculo de $N_{b,Rd}$ para elementos de secção e esforço axial constantes é dado pela equação

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{G.29})$$

em que χ é o coeficiente de redução para o modo de encurvadura relevante. Este coeficiente, no caso de elementos solicitados a compressão axial, é determinado pela equação G.30 em função da esbelteza adimensional $\bar{\lambda}$ e do parâmetro Φ , dados, respectivamente, pelas equações G.31 e G.32.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mas } \chi \leq 1,0 \quad (\text{G.30})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (\text{G.31})$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (\text{G.32})$$

Nas expressões G.31 e G.32, α representa o factor de imperfeição generalizado, N_{cr} a carga crítica elástica (carga crítica de Euler) associada ao modo relevante de encurvadura, L_{cr} o comprimento de encurvadura correspondente, i o raio de giração da secção em relação ao eixo apropriado, e $\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = 93,9 \cdot \epsilon$, sendo $\epsilon = \sqrt{235/f_y}$ (f_y em N/mm²).

As imperfeições reais das peças são contabilizadas no dimensionamento de elementos estruturais à compressão através do factor de imperfeição α_i . Este factor, associado à curva de encurvadura a adoptar, depende da geometria das secções transversais, da classe e processo de fabrico do aço e do plano de encurvadura condicionante. O factor α_i é dado no quadro G.1 em função das curvas de encurvadura a₀, a, b, c e d. As curvas de encurvadura para as diferentes secções transversais são dadas no quadro 6.2 do EC3-1-1. Na Figura G.5 apresenta-se um excerto desse quadro, apresentando-se exclusivamente o caso particular da secção transversal de interesse.

Tabela G.1: Factores de imperfeição para as curvas de encurvadura [58].

Curva de encurvadura	a ₀	a	b	c	d
Factor de imperfeição α_i	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76


Secção transversal		Limites	Encurvadura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Seções tubulares		acabadas a quente	qualquer	a	A ₀
		enformadas a frio	qualquer	c	c

Figura G.5: Quadro de caracterização da curva de encurvadura para secções tubulares [58].

Por fim, o comprimento de encurvadura por flexão em elementos lineares com diferentes condições de apoio é apresentado na Figura G.6.


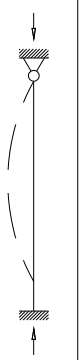

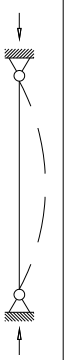


					
0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0

Figura G.6: Comprimento de encurvadura L_{cr} no plano de encurvadura considerado [58].

G.2 Disposições do Eurocódigo 3 Parte 1-8: Projecto de ligações

A Parte 1-8 do Eurocódigo 3 (EC3-1-8) apresenta as disposições para a boa prática do *Projecto de ligações* [59]. Neste parágrafo será apresentado o valor de cálculo da resistência individual de ligações aparafusadas solicitadas ao corte e/ou à tracção.

A resistência de um parafuso ao corte e à tracção é verificada se, para o valor de cálculo do esforço transversal, $F_{v,Ed}$, e de tracção, $F_{t,Ed}$, por parafuso, forem válidas, respectivamente, as condições

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (\text{G.33})$$

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (\text{G.34})$$

em que $F_{v,Rd}$ e $F_{t,Rd}$ são, respectivamente, os valores de cálculo das resistências ao corte e à tracção, por parafuso.

O valor de cálculo da resistência ao corte por parafuso, $F_{v,Rd}$, é dada por

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (\text{G.35})$$

em que f_{ub} é o valor nominal da tensão de rotura à tracção dos parafusos, A a área da secção transversal bruta do parafuso e α_v , o parâmetro que depende da classe do parafuso; no caso particular de parafusos de classe 10.9, $\alpha_v = 0,5$. De acordo com EC3-1-8, o valor recomendado para o coeficiente parcial de segurança para ligações por parafusos, γ_{M2} , é 1,25.

O valor de cálculo da resistência à tracção por parafuso, $F_{t,Rd}$, é dado pela expressão

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (\text{G.36})$$

em função da área da secção resistente do parafuso, A_s , e do parâmetro k_2 que para parafusos com cabeça de embeber assume o valor 0,63 e para outros casos é igual a 0,9.

Anexo H

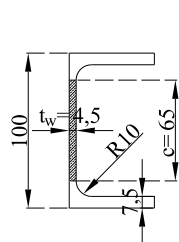
Classificação das Secções Transversais do Seguidor Solar

Seguidamente apresenta-se a classe da secção transversal de cada elemento estrutural. A classificação das secções transversais é atribuída de acordo com as respectivas características geométricas apresentadas e os esforços máximos que nelas actuam.

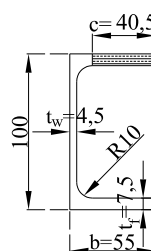
O parâmetro ϵ , que entra nas relações usadas para a classificação das secções transversais, apresenta os seguintes valores: $\epsilon = 1$ para S 235; $\epsilon = 0,92$ e $\epsilon^2 = 0,85$ para S 275 [55].

• Secção transversal C

Para efeitos da classificação da alma considerou-se que esta está sujeita à flexão simples e que o banzo está solicitado à compressão.



(a) Dimensões c e t_w da alma. [mm]



(b) Dimensões c e t_f do banzo. [mm]

▷ Alma solicitada à flexão: $\frac{c}{t_w} = \frac{65}{4,5} = 14,44 \leq 72\epsilon = 72 \Rightarrow$ Classe 1.

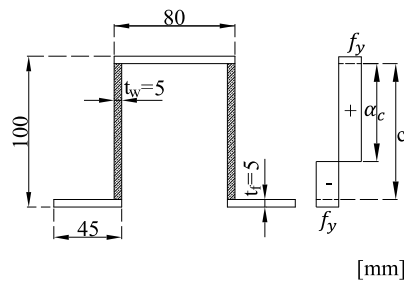
▷ Banzo solicitado à compressão: $\frac{c}{t_f} = \frac{b-t_w-r}{t_f} = \frac{40,5}{7,5} = 5,40 \leq 9\epsilon = 9 \Rightarrow$ Classe 1.

► Secção de **classe 1**.

• Secção transversal OM

Como foi referido em §5.1.1, os perfis OM₆ e OM₇ estão sujeitos ao momento flector $M_{y,Ed}$ e esforço axial, N_{Ed} , máximos, pelo que a classificação da secção OM é feita com base nos esforços obtidos nos referidos perfis. Segundo a Tabela 5.2, os esforços de tracção N_{Ed} e momento $M_{y,Ed}$ máximos ocorrem na secção 61_e e resultam da combinação de acções [P,A] (ASCE): $N_{Ed} = 16,24$ kN e $M_{y,Ed} = -8,04$ kNm.

No caso em que uma secção está sujeita à interacção de esforço axial e momento flector, a classificação da alma é feita em conformidade com o caso relativo a “componente solicitada à flexão e à compressão” apresentado no quadro da Figura 5.2. De acordo com este, para a classificação da alma é necessário determinar o parâmetro α_c que representa a zona comprimida da alma, indicada na figura seguinte.



Admitindo que a alma é de classe 1 ou 2, assume-se uma distribuição plástica de tensões. Na presença de momento flector, e do esforço axial de valor $N_{Ed} = 16,24$ kN, a distância à linha neutra (LN) da secção, d_{LN} , indicada na Figura H.1, é dada pela relação

$$\text{Área}_{\text{tracção}} \cdot f_y - \text{Área}_{\text{compressão}} \cdot f_y = N_{Ed} \Leftrightarrow d_{LN} = 44,1 \text{ mm}$$

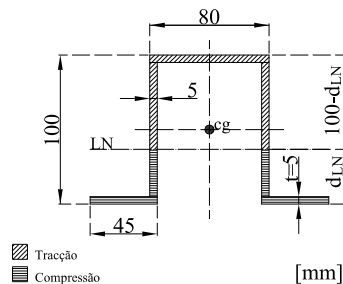


Figura H.1: Distância d_{LN} à linha neutra.

O parâmetro α_c é calculado a partir da relação

$$\alpha_c \cdot c = d_{LN} - t \Leftrightarrow \alpha_c \cdot 0,090 = (0,0441 - 0,005) \Leftrightarrow \alpha_c = 0,43.$$

Assim, de acordo com o quadro da Figura G.1, como $\alpha_c \leq 0,5$, a classificação da alma é feita com base na expressão $\frac{c}{t} \leq \frac{36 \cdot \epsilon}{\alpha_c}$.

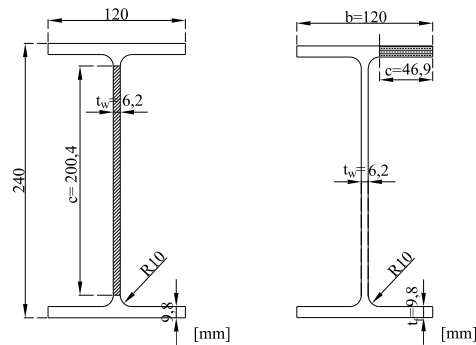
▷ Alma solicitada à flexão e à compressão: $\frac{c}{t} = \frac{90}{5} = 18 \leq \frac{36 \cdot \epsilon}{\alpha_c} = \frac{36 \cdot 1}{0,43} = 83,08 \Rightarrow$
Classe 1

▷ Banzo solicitado à compressão: $\frac{c}{t} = \frac{40}{5} = 8 \leq 9\epsilon = 9 \Rightarrow$ Classe 1

► Secção de **classe 1**.

• **Secção transversal IPE 240 das vigas V1, V2 e V3**

Para a classificação das secções IPE 240, admitiu-se que a alma de qualquer uma das secções das três vigas está sujeita à flexão simples e o banzo à compressão uniforme.



(a) Dimensões c e t_w da alma. (b) Dimensões c e t_f do banzo.

▷ Alma solicitada à flexão: $\frac{c}{t_w} = \frac{190,4}{6,2} = 30,71 \leq 72\epsilon = 72 \cdot 0,92 = 66,24 \Rightarrow$ Classe 1

▷ Banzo solicitado à compressão: $\frac{c}{t_f} = \frac{(b-2 \cdot r - t_w)}{t_f} = \frac{46,9}{9,8} = 4,79 \leq 9\epsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,28 \Rightarrow$ Classe 1

► As secções IPE 240 das vigas V1, V2 e V3 são de **classe 1**.

• **Secção transversal rectangular oca (tubos facar)**

Uma das hipóteses simplificativas admitidas na modelação da estrutura foi que os três tubos de secção rectangular oca, soldados entre si, de dimensões $300 \times 200 \times 8$ mm (Anexo A) cada, são representados por uma peça única de secção transversal equivalente às três. No entanto, para fins da classificação deste elemento estrutural, considerou-se que o processo mais correcto seria atribuir ao conjunto a mesma classificação que a da secção transversal de um dos seus tubos constituintes ($300 \times 200 \times 8$ mm).

Como se pode observar na Tabela 5.6 a secção da peça formada pelo conjunto dos três tubos de secção rectangular oca, está submetida a flexão segundo os dois eixos, $y - y$ e $z - z$ (flexão desviada). A classificação da secção em flexão desviada (cf. Figura G.1) pode ser efectuada considerando a situação mais desfavorável, em que uma das “paredes”, a horizontal de maior comprimento, fica totalmente comprimida e a outra, vertical, submetida à flexão [60]. No caso da secção em análise as “paredes” horizontal, de maior comprimento, e vertical têm as dimensões $b = 300$ mm e $h = 200$ mm, respectivamente.

▷ “Parede” horizontal solicitada à compressão: $\frac{c}{t} \approx \frac{b-3 \cdot t}{t} = \frac{300-3 \cdot 8}{8} = 34,5 \leq 38\epsilon = 38 \cdot 0,92 = 34,96$

▷ “Parede” vertical solicitada à flexão: $\frac{c}{t} \approx \frac{h-3 \cdot t}{t} = \frac{200-3 \cdot 8}{8} = 22 \leq 72\epsilon = 72 \cdot 0,92 = 66,24 \Rightarrow$ Classe 1

► A secção $300 \times 200 \times 16$ e, conseqüentemente, a secção dos tubos facar é de **classe 1**.

- **Secção tubular (coluna pequena):**

▷ $\frac{d}{t} = \frac{559}{15,9} = 35,16 \leq 50\epsilon^2 = 50 \cdot 0,85 = 42,5 \Rightarrow$ Classe 1

► A secção transversal da coluna pequena é de **classe 1**.

- **Secção tubular (coluna grande):**

▷ $\frac{d}{t} = \frac{762}{15,9} = 47,92 \not\leq 50\epsilon^2 = 50 \cdot 0,85 = 42,5$

▷ $\frac{d}{t} = 47,92 \leq 70\epsilon^2 = 70 \cdot 0,85 = 59,5 \Rightarrow$ Classe 2

► A secção transversal da coluna grande é de **classe 2**.